

Université de Skikda.
Faculté de technologie
Département : Génie Civil.
Réf : - D012124018D-



جامعة 20 أوت سكيكدة
كلية التكنولوجيا
قسم: الهندسة المدنية
المرجع: -D012124018D-

Thèse présentée en vue de l'obtention
Du diplôme de
Doctorat en sciences

En Génie Civil

Option : Géotechnique

Thème :

Traitement des sols argileux par des polymères

Présentée par :
Saida Belouahem

Soutenue publiquement le 02/07/2024
Devant le jury composé de :

Mme Mendjel Djenette	MCA	Université de Skikda	Présidente
Mr. Nouaouria Mohamed Salah	Professeur	Université de 8 mai 1945Guelma	Encadreur
Mr. Messast Salah	Professeur	Université de Skikda	Co -encadreur
Mr. Laouar Mohamed Salah	Professeur	Université Tébéssa	Examinateur
Mr. Bouteldja Fathe	MCA	Université de 8 mai 1945Guelma	Examinateur
Mme Rehab Bekkouche Souhila	Professeur	Université de Skikda	Invitée

Année universitaire : 2023-2024

Remerciement

Je commence par remercier Le DIEU pour m'avoir donné la volonté, le courage, la patience et tout ce qui est nécessaire pour terminer cette thèse.

Mes remerciements vont à l'âme de ma mère et mon père Ceux qui m'ont accompagné et aidé durant l'élaboration de ce travail ;

A mon encadreur Monsieur M. S. Nouaouria

A mon co-encadreur Monsieur S. Messasset qui m'ont dirigé tout au long de ces années de thèse.

A madame Rehab Bekkouche Souhila qui a proposé ce thème et m'a dirigé toute au long de ces années, et cette thèse a bénéficié de leur lecture et relecture très attentive et de leurs remarques précieuses

Amon marri et mes enfants

A mes chères amies Fatima Laib, Fligha Maroua et Add Elouahad

Assia qui m'ont encouragé pour finir ce travail

A Melle Mendjel Djenette la présidente de jury et les membres de jury Monsieur Bouteldja Fateh et Monsieur M.S. Laouar d'avoir accepté d'examiner et critiquer mon travail et assister à ma soutenance.

A tout le personnel du laboratoire LNHC EST SKIKDA

Et toutes les personnes que j'ai rencontrées dans ce laboratoire

Je tiens aussi à remercier mon marie et toute ma famille

Et tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin.

Résumé

Les matériaux argileux, que ce soient les sols ou les roches, sont très fréquents et couvrent une partie considérable du globe terrestre. Les sols argileux possèdent la curieuse propriété de voir leur consistance se modifier en fonction de leur teneur en eau. Des variations de volumes plus ou moins conséquentes en fonction de la structure du sol et des minéraux en présence, accompagnent ces modifications de consistance. Ainsi, lorsque la teneur en eau augmente dans un sol argileux, on assiste à une augmentation du volume de ce sol, on parle alors de « gonflement des argiles », tandis qu'un déficit en eau provoquera un phénomène inverse de rétractation ou « retrait des argiles ».

La maîtrise du phénomène de gonflement demande de grandes connaissances afin de minimiser les dégâts occasionnés par ce phénomène sur les différents ouvrages construits en formations argileuses.

La stabilisation des sols argileux a été étudiée par un grand nombre de chercheurs. Beaucoup de méthodes et d'appareillages ont été mis au point, pour connaître l'influence de l'efficacité d'une solution ou d'un produit sur la stabilisation d'un sol argileux.

L'objectif principal de cette recherche est l'étude de l'influence des polymères sur les propriétés géotechniques des argiles en se basant sur les différents essais au laboratoire, car il a été prouvé par des études antérieures l'effet très positif de l'ajout des polymères sur l'amélioration des caractéristiques géotechniques des sols argileux.

Mots clé : Argile, Essai Géotechnique, Gonflement, Polymères, Stabilisation.

Abstract

Clay materials, whether soils or rocks, are very common and cover a considerable part of the earth's globe. Clay soils have the curious property of seeing their consistency change according to their water content. More or less significant variations in volumes depending on the structure of the soil and the minerals present, accompany these changes in consistency. Thus, when the water content increases in a clay soil, there is an increase in the volume of this soil, which is then referred to as "clay swelling", while a water deficit will cause an inverse phenomenon of shrinkage or "shrinkage of clays". While a lack of water will cause an inverse phenomenon of shrinkage or "shrinkage of clays".

Controlling the phenomenon of swelling requires a great deal of knowledge in order to minimize the damage caused by this phenomenon on the various structures built in clay formations.

The stabilization of clay soils has been studied by a large number of researchers. Many methods and equipment's have been developed to determine the influence of the effectiveness of a solution or product on the stabilization of clay soil.

The main objective of this research is to study the influence of polymers on the geotechnical properties of clays based on the various laboratory tests, this is because previous studies have proven the very positive effect of the addition of polymers on improving the geotechnical characteristics of clay soils

Key words: Clay, Geotechnical Tests, Swelling, Polymers, Stabilization.

ملخص

المواد الطينية، سواء كانت تربة أو صخور، متوفرة بكثرة وتغطي جزءا كبيرا من الكرة الأرضية حيث تتمتع التربة الطينية بخاصية غريبة تتمثل في تغير اتساقها وفقا لكمية الماء التي تحتويها. تغيرات في الحجم للأكثر أو الأقل تتوافق مع بنية التربة والمعادن الموجودة، عندما يزداد محتوى الماء في التربة الطينية، هناك زيادة في حجم هذه التربة، والتي يشار إليها بعد ذلك باسم "انتفاخ الطين"، في حين أن نقص المياه سيؤدي إلى ظاهرة عكسية من الانكماش ما يعرف بـ"انكماش الطين". تتطلب السيطرة على ظاهرة الانتفاخ قدرا كبيرا من المعرفة من أجل تقليل الأضرار التي تسببها هذه الظاهرة على الهياكل المختلفة من بنايات ومنشآت.

تمت دراسة استقرار التربة الطينية من قبل عدد كبير من الباحثين. العديد من الطرق والمعدات وضعت حيز العمل من أجل تحديد تأثير وفعالية المواد المستعملة في معالجة مشكل انتفاخ التربة الطينية والعمل على استقرارها. الهدف الرئيسي من هذا البحث هو دراسة تأثير اللدائن على الخواص الجيوتقنية للطين بناء على التحارب المخبرية المختلفة، حيث أثبتت الدراسات السابقة التأثير الإيجابي والفعال لهذه المواد على تحسين الخصائص الجيوتقنية للتربة الطينية.

الكلمات المفتاحية: الطين، الاختبار الجيوتقني، التورم، البوليمرات، التثبيت.

Table des matières

1	REMERCIEMENT.....	I
2	RESUME.....	II
3	ABSTRACT.....	III
4	ملخص.....	IV
5	TABLE DES MATIERES	VII
6	LISTE DES FIGURES	XI
7	LISTE DES TABLEAUX	VIII
8	NOTATIONS	IX
9	INTRODUCTION GENERALE.....	1
10	1CHAPITRE 1 : LES SOLS ARGILEUX.....	3
1.1	INTRODUCTION.....	4
1.2	MINERAUX ARGILEUX.....	4
1.2.1	LA KAOLINITE	5
1.2.2	L'ILLITE	6
1.2.3	LA MONTMORILLON	6
1.2.4	CHLORITE	7
1.3	LE GONFLEMENT DES ARGILES.....	8
1.4	MECANISMES DE GONFLEMENT	8
1.5	CAUSES ET CONSEQUENCES DU GONFLEMENT	8
1.5.1.	CAUSES DU GONFLEMENT	8
1.5.1	CONSEQUENCES DU GONFLEMENT	9
1.6	CONCLUSION.....	11
11	2CHPITRE 2 : LES POLYMERES	12
2.1	INTRODUCTION.....	13
2.1	DIFFERENTS TYPES DE POLYMERES	13
2.2	CLASSIFICATION SELON L'ORIGINE.....	13
2.3	CLASSIFICATION SELON L'ARCHITECTURE	14

2.3.1	LES POLYMERES D'ARCHITECTURE LINEAIRE	14
2.3.2	LES ARCHITECTURES RAMIFIEES	14
2.3.3	LES POLYMERES RETICULES OU « CROSSLINKED POLYMERES »	14
2.4	CLASSIFICATION SELON LA STRUCTURE CHIMIQUE	15
2.4.1	LES HOMOPOLYMERES	15
2.4.2	LES COPOLYMERES	15
2.5	CLASSIFICATION SELON LE COMPORTEMENT THERMIQUE	15
2.5.1	LES THERMOPLASTIQUES	16
2.5.2	LES THERMODURCISSABLES	16
2.5.3	LES ELASTOMERES.....	16
2.6	UTILISATION DES POLYMERES	16
2.7	TRAITEMENT DES SOLS PAR DES POLYMERES.....	18
2.8	CONCLUSION.....	20
12	<u>3CHPITRE 3 : TRAITEMENT DES SOLS ARGILEUX GONFLANTS</u>	22
3.1	INTRODUCTION.....	23
3.2	STABILISATION PAR L'AJOUT DE DIFFERENTS TYPES DE MATERIAUX.....	23
3.2.1	STABILISATION PAR L'AJOUT DE DECHETS DE MARBRE	23
3.2.2	TRAITEMENT DES SOLS A LA CHAUX	24
3.2.3	STABILISATION PAR L'AJOUT DES CENDRES VOLANTES	25
3.2.4	STABILISATION PAR L'AJOUT DE LA POUDRE DE COQUILLE D'ŒUF	26
3.2.5	STABILISATION PAR L'AJOUT DE LA POUDRE DE MARBRE	26
3.2.6	STABILISATION PAR LES FIBRES NATURELLES	27
3.2.7	STABILISATION DES SOLS GONFLANTS PAR LES POLYMERES	27
3.3	CONCLUSION.....	30
13	<u>4CHAPITRE 4 : ESSAISEXPERIMENTAUX.....</u>	32
4.1	INTRODUCTION.....	33
4.2	MATERIAUX UTILISES	34
4.2.1	LE SOL NATUREL	34
4.2.2	LA BENTONITE DE MEGHNIA.....	34
4.2.3	LE PVC (POLYCHLORURE DE VINYLE).....	36
4.2.4	LE PEHD (POLYETHYLENE HAUTE DENSITE)	36
4.2.5	LE PEBD (POLYETHYLENE BASSE DENSITE)	37
4.2.6	PET (POLYETHYLENE TEREPTALATE)	38
4.2.7	POLYPROPYLENE PP (POLYPROPYLENE).....	39
4.3	PROGRAMME EXPERIMENTAL.....	40
4.3.1	ESSAI AU BLEU DE METHYLENE (NF P94-068)	42
4.3.2	TENEUR EN EAU W (NF P 94-050).....	43
4.3.3	ANALYSE GRANULOMETRIQUE : (NF P 94-056).....	44
4.3.4	ANALYSE GRANULOMETRIQUE PAR SEDIMENTATION (NF P94-056)	44
4.3.5	LIMITE D'ATTERBERG (NF P94-052).	45

4.3.6	ANALYSE MECANIQUE : ESSAI PROCTOR (NF P94 -093)	45
4.3.7	ESSAI DE CISAILLEMENT RECTILIGNE (NF P 94-071-1)	46
4.3.8	L'ESSAI ŒDOMETRIQUE : (XP 94-090-01)	47
4.4	CONCLUSION.....	48
5 CHAPITRE 5 : RESULTATS ET DISCUSSIONS		49
5.1	INTRODUCTION.....	50
5.2	PROPRIETES D'IDENTIFICATION DE L'ARGILE DE RAMDAN DJAMEL	51
5.2.1	VALEUR AU BLEU DE METHYLENE	51
5.2.2	ANALYSE GRANULOMETRIQUE	51
5.2.3	TENEUR EN EAU ET DENSITE SECHE	51
5.2.4	ESSAI DE COMPACTAGE	52
5.2.5	LIMITES D'ATTERBERG	52
5.2.6	CARACTERISTIQUES INTRINSEQUES.....	54
5.2.7	CARACTERISTIQUES ŒDOMETRIQUES.....	54
5.3	EFFET DE L'AJOUT DE BENTONITE SUR LES CARACTERISTIQUES DE L'ARGILE DE RAMDAN DJAMEL	56
5.3.1	LA VALEUR AU BLEU DE METHYLENE.....	56
5.3.2	LA TENEUR EN EAU ET LA MASSE VOLUMIQUE SECHE	57
5.3.3	LES LIMITES D'ATTERBERG	58
5.3.4	LES CARACTERISTIQUES INTRINSEQUES.....	59
5.3.5	EFFET DE LA BENTONITE SUR LA COHESION	59
5.3.6	EFFET DE LA BENTONITE SUR L'ANGLE DE FROTTEMENT.....	59
5.3.7	LES PARAMETRES DE GONFLEMENT	60
5.4	TRAITEMENT DES SOLS PAR LES POLYMERES	63
5.4.1	EFFET DE PVC (POLYCHLORURE DE VINYLE)	63
5.5	TRAITEMENT PAR LE POLYPROPYLENE PP	69
5.5.1	EFFET DE PP SUR LES VALEURS AU BLEU DE METHYLENE	69
5.5.2	EFFET DE PP SUR LES PARAMETRES COMPACTAGE.....	70
5.5.3	EFFET DE PP SUR LES LIMITES D'ATTERBERG :	73
5.5.4	EFFET DE PP SUR LES CARACTERISTIQUES INTRINSEQUES	74
5.5.5	EFFET DE PP SUR LES CARACTERISTIQUES ŒDOMETRIQUES.....	75
5.6	TRAITEMENT PAR LE PEHD (POLYETHYLENE HAUTE DENSITE)	76
5.6.1	EFFET DE PEHD SUR LA VALEUR AU BLEU DE METHYLENE	76
5.6.2	EFFET DE PEHD SUR LES PARAMETRES DE COMPACTAGE	77
5.6.3	EFFET DE PEHD SUR LES LIMITES ATTERBERG	78
5.7	TRAITEMENT PAR LE PEBD POLYETHYLENE BASSE DENSITE	79
5.7.1	EFFET DE PEBD (POLYETHYLENE BASSE DENSITE) SUR LES VALEURS AU BLEU DE METHYLENE	79
5.7.2	EFFET DE PEBD (POLYETHYLENE BASSE DENSITE) SUR LES PARAMETRES DE COMPACTAGE.....	79
5.7.3	EFFET DE PEBD POLYETHYLENE BASSE DENSITE SUR LES LIMITES D'ATTERBERG	81
5.8	TRAITEMENT PAR LE PET POLYETHYLENE TEREPHTALATE	81
5.8.1	EFFET DE PET SUR LES VALEURS AU BLEU DE METHYLENE.....	81
5.8.2	EFFET DE PET SUR LES PARAMETRES DE COMPACTAGE	82
5.8.3	EFFET DE PET SUR LES LIMITES ATTERBERG :	84

5.9	CONCLUSION.....	84
15	<u>CONCLUSION GENERALE</u>	<u>86</u>
16	<u>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</u>	<u>88</u>

Liste des figures

Figure 1 Structure élémentaire tétraédrique	4
Figure 2 Structure Particulaire de la Kaolinite.....	5
Figure 3 Structure Particulaire de L'Illite	6
Figure 4 Structure Particulaire de la Montmorillonite	7
Figure 5 Structure de la particule de chlorite	7
Figure 6 Formes de dégâts sur des bâtiments reposant sur des terrains gonflants (Mourroux Pet al 1988).....	10
Figure 7 Fissuration longitudinale de routes due au retrait et gonflement des sols (Ferrah. F. 2006).	11
Figure 8 Différent type de polymères (Différents types de matières plastiques, " http://: cap-sciences.net/upload/differents_plastiques).	13
Figure 9 Classification des architectures macromoléculaires selon TAMOLIA (D. A. Tomalia et al,2001).	15
Figure 10 Des objets plastiques d'usage courant (Différents types de matières plastiques, " http://: cap-sciences.net/upload/differents_plastiques).	18
Figure 11 (a) Variation du L.L. du sol avec les cendres volantes. (b) Variation de la densité du sol en fonction des cendres volantes. (c) Variation de la densité sèche du sol avec les cendres volantes. (d) Variation de la résistance à la compression non confinée du sol avec les cendres volantes (Naji et al 2020).....	26
Figure 12 Effet de PVC sur le CBR [20].....	28
Figure 13 Effet de PEHD sur le CBR [20].....	28
Figure 14 Test de consolidation pour différents taux de PMA (Qassun. S. M. S et Safa. H. H, 2018)..	30
Figure 15 Zone de prélèvement des échantillons.....	34
Figure 16 La Bentonite Meghnia.....	35
Figure 17 Le Polychlorure de Vinyle –PVC.....	36
Figure 18 Granulé de PEHD	37
Figure 19 Granulé de PEBD.....	38
Figure 20 Granulé de PET.....	39
Figure 21 Polypropylène PP.....	40
Figure 22 Essai au Bleu de Méthylène	43
Figure 23 Préparation de l'essai de la teneur en eau	43
Figure 24 Préparation de l'essai granulométrique lavage des échantillons	44
Figure 25 Matériels de l'essai sédimentométrique.....	45
Figure 26 Matériel utilisé dans l'essai de Limites d'Atterberg	45
Figure 27 Détermination de la limite de liquidité.	45
Figure 28 Appareillage nécessaire pour l'essai Proctor.....	46
Figure 29 Boite de Cisaillement.....	47
Figure 30 Cellule Œdométrique type Terzaghi	48
Figure 31 Les composants de la cellule œdométrique	48
Figure 32 Courbe d'analyse granulométrique et sédimentométrique du sol.....	51
Figure 33 Courbe de compactage pour l'argile de Ramdan Djamel.....	52
Figure 34 Résultat de l'essai de limites d'Atterberg	53
Figure 35 Courbe intrinsèque de l'argile de Ramadan Djamel	54
Figure 36 Courbe oedométrique	55

Figure 37 Effet de l'ajout de la Bentonite sur les Valeurs au bleu de méthylène.....	57
Figure 38 Effet de la Bentonite sur la teneur en eau et la masse volumique sèche.....	57
Figure 39 Effet de la Bentonite sur la masse volumique sèche.....	58
Figure 40 Effet de la Bentonite sur la teneur en eau optimale.....	58
Figure 41 Variation des limites d'Atterberg en fonction de la teneur en bentonite.....	58
Figure 42 Effet de l'ajout de la bentonite sur la cohésion des sols reconstitués.....	59
Figure 43 Effet de l'ajout de la bentonite sur l'angle de frottement des sols reconstitués.....	60
Figure 44 Effet de la Bentonite sur l'indice de compressibilité.....	60
Figure 45 Effet de la Bentonite sur l'indice de gonflement.....	61
Figure 46 Effet de la bentonite sur la pression de gonflement.....	61
Figure 47 Effet du PVC sur les valeurs de bleu de méthylène.....	63
Figure 48 Effet de l'ajout de PVC sur la masse volumique sèche pour les mélanges étudiés.....	64
Figure 49 Effet de l'ajout de PVC sur la teneur en eau optimale pour les mélanges étudiés.....	64
Figure 50 Variation de l'indice de plasticité en fonction de taux de polychlorure de vinyle PVC.....	65
Figure 51 Effet de PVC sur l'angle de frottement interne.....	66
Figure 52 Effet de PVC sur la Cohésion pour les différents mélanges.....	66
Figure 53 Effet de PVC sur la pression de gonflement.....	67
Figure 54 Effet de PVC sur l'indice de compressibilité.....	68
Figure 55 Effet de PVC sur le coefficient de gonflement.....	68
Figure 56 Effet de PP sur les valeurs de bleu de méthylène.....	69
Figure 57 Courbes Proctor en fonction des différents taux de PP pour l'argile de Ramdan Djamel....	70
Figure 58 Effet de PP sur la teneur en eau pour l'argile de Ramdane Djamel.....	70
Figure 59 Effet de PP sur la masse volumique sèche pour l'argile de Ramdan Djamel.....	70
Figure 60 Effet de PP sur la teneur en eau pour le sol reconstitué par 6% de bentonite.....	71
Figure 61 Effet de PP sur la masse volumique sèche pour le sol reconstitué par 6% de bentonite.....	71
Figure 62 Effet de PP sur la densité sèche et la teneur en eau pour le sol reconstitué par 12% de bentonite.....	71
Figure 63 Effet de PP sur la densité sèche et la teneur en eau pour le sol reconstitué par 20% de bentonite.....	72
Figure 64 Effet de PP sur la densité sèche et la teneur en eau pour le sol reconstitué par 25% de bentonite.....	72
Figure 65 Effet de PP sur les Limites d'Atterberg pour les mélanges de sols.....	73
Figure 66 Effet de PP sur la cohésion des sols.....	74
Figure 67 Effet de PP sur l'angle de frottement interne des sols.....	74
Figure 68 Effet de PP sur la pression de gonflement.....	75
Figure 69 Effet de PP sur l'indice de compressibilité.....	75
Figure 70 Effet de PP sur le coefficient de gonflement.....	76
Figure 71 Effet de polyéthylène haute densité PEHD sur les valeurs de bleu de méthylène.....	76
Figure 72 Effet de PEHD sur la masse volumique sèche des sols reconstitués par la bentonite.....	77
Figure 73 Effet de PEHD sur la teneur en eau optimal des sols reconstitués par bentonite.....	77
Figure 74 Effet de PEHD sur l'indice de plasticité.....	78
Figure 75 Effet de PEBD sur le VB des différents mélanges.....	79
Figure 76 Effet de PEBD sur la densité sèche.....	80
Figure 77 Effet de PEBD sur la teneur en eau.....	80
Figure 78 Effet de PEBD sur l'indice de plasticité.....	81
Figure 79 Effet de PET sur le VB des sols reconstitués.....	81
Figure 80 Courbes Proctor de l'argile naturelle avec différents taux de PET.....	82

Figure 81 Courbes Proctor avec différents taux de PET pour le sol reconstitué par 6% de bentonite. 82
Figure 82 Courbes Proctor avec différents taux de PET pour le sol reconstitué par 12% de bentonite
..... 83
Figure 83 Courbes Proctor avec différents taux de PET pour le sol reconstitué par 20% de bentonite
..... 83
Figure 84 Courbes Proctor avec différents taux de PET pour le sol reconstitué par 25% de bentonite
..... 83
Figure 85 Effet de PET sur les limites d'Atterberg pour les différents mélanges 84

Liste des tableaux

<i>Tableau 1 Comparaison entre les différentes familles d'argile</i>	<i>7</i>
<i>Tableau 2 Exemples de monomères et des polymères correspondants (Yueo Zha, 2008).....</i>	<i>18</i>
<i>Tableau 3 Résultats des essais pour le sol traité avec le PVA (Magdi. M. E et al, 2019).....</i>	<i>30</i>
<i>Tableau 4 Les propriétés de la bentonite.....</i>	<i>35</i>
<i>Tableau 5 Propriétés de PEHD.....</i>	<i>37</i>
<i>Tableau 6 Propriétés de PEBD.....</i>	<i>38</i>
<i>Tableau 7 Propriétés de PET.....</i>	<i>39</i>
<i>Tableau 8 Propriétés de PP</i>	<i>40</i>
<i>Tableau 9 propriétés de PP.....</i>	<i>41</i>
<i>Tableau 10 Classification des sols en fonction de la valeur VBS (Philipponnat 2003)</i>	<i>43</i>
<i>Tableau 11 Classification des sols en fonction de coefficient de compression</i>	<i>54</i>
<i>Tableau 12 Classification des sols en fonction de coefficient de gonflement selon (Magnan 2001).....</i>	<i>55</i>
<i>Tableau 13 Caractéristiques physico-mécaniques de l'argile de Ramdan Djamel.....</i>	<i>56</i>
<i>Tableau 14 Effet de la Bentonite sur les paramètres de gonflement.....</i>	<i>62</i>
<i>Tableau 15 Potentiel de gonflement en fonction des critères géotechniques</i>	<i>62</i>

Notations

IP : Indice de Plasticité

γ_d : densité sèche

Ic : Indice de consistance I

VB : Valeur de Bleu de méthylène

W_L : Limite de Liquidité

W_P : Limite de Plasticité

C : Cohésion

D10 : diamètre des particules des grains correspond à 10% de passant

D50 : diamètre des particules des grains correspond à 50% de passant

D60 : diamètre des particules des grains correspond à 60% de passant

Kg : Kilogramme (Unité de poids)

Cm : Centimètre (Unité de longueur)

°C : Température

ρ : Masse volumique du sol

ρ_d : Masse volumique sèche du sol

W : Teneur en eau

W_{opt} : Teneur en eau optimale

Introduction générale

Le phénomène des argiles gonflantes en Algérie pose de sérieux problèmes. Le changement de volume d'un sol argileux, suite à un apport d'eau extérieur. Lorsque la teneur en eau augmente dans un sol argileux, on assiste à une augmentation du volume de ce sol et si le sol ne peut pas gonfler librement, il appliquera une pression sur les structures, ce qui peut éventuellement causer des dommages aux constructions. Ce phénomène affecte chaque année diverse types de structures (Bâtiments légers, chaussées, etc....) causant des désordres considérables qui imposent des reprises en sous œuvre très coûteuses et dont la réalisation n'est souvent pas maîtrisée.

Aujourd'hui, une littérature détaillée est disponible et une recherche mondiale sur la stabilisation des sols gonflants à l'aide d'un large éventail de matériaux classiques et émergents progrès pour dégager des résultats pouvant répondre aux besoins de l'ingénieur. Ainsi, l'utilisation des polymères est devenue de plus en plus courante dans de nombreux domaines d'activité. Le choix d'un matériau polymère se fait aujourd'hui à partir d'un large éventail d'espèces de polymères avec de nombreuses possibilités de mise en œuvre. La légèreté et le faible coût des polymères, les rendent largement matériaux usagés. Chaque domaine d'activité exploite des propriétés spécifiques qui répondent à leurs spécifications.

L'objectif principale de ce travail est la caractérisation expérimentale d'un sol gonflant en interaction avec plusieurs types de polymères de différentes tailles et formes, l'intensité de problème de gonflement du sol est contrôlée par la variation de la teneur en bentonite dans le sol. Pour parvenir nous avons mis en place un programme de recherche autour de techniques de caractérisation appropriées. L'orientation de ce programme en fonction des résultats de chaque type d'essai nous a permis de mieux comprendre l'effet des ajouts sur le comportement mécanique et la stabilisation des sols gonflants.

Le protocole expérimental suivi dans cette recherche est basé sur les essais de laboratoire de caractérisation et de classification des sols, à savoir : la valeur au bleu de méthylène, l'analyse granulométrique par sédimentation ainsi, la teneur en eau et la masse volumique sèche ainsi la détermination des caractéristiques mécaniques de cisaillement, et les paramètres de l'essai œdométrique pour étudier gonflement et le comportement mécanique de l'argile de Ramadan Djamel et les sols reconstitués par la bentonite avec .

Ce mémoire est structuré en Cinq chapitres :

Le chapitre 1 présente les argiles, leurs comportements, leurs composants et liaisons par les interactions intergranulaires (entre les feuillets argileux). La notion des sols non saturés, les propriétés, les relations avec le phénomène de gonflement. Une définition sur les sols gonflants ainsi qu'une description détaillée de mécanisme de gonflement et les différents types des sols argileux.

Le chapitre 2 décrit les polymères, leurs comportements, leurs compositions et liaisons par les interactions internes et une présentation des principales généralités sur les polymères et leur utilisation.

Le chapitre 3 est consacré à un état de l'art sur les méthodes de stabilisation et d'amélioration des sols, en accordant une importance particulière à l'utilisation des polymères comme matériaux de traitement.

Le chapitre 4 présente les différents matériaux et la localisation géographique de la zone d'étude, ainsi que la présentation des essais utiliser dans notre étude. Ce chapitre décrit également les méthodes utilisées dans cette recherche pour la caractérisation des échantillons.

Le chapitre 5 est dédié à l'analyse des résultats des essais pour les sols non traités et les sols traités et l'évaluation de l'influence de l'ajout de la Bentonite ainsi que les polymères utilisés sur le taux et l'amplitude de potentiel de gonflement et sur le comportement mécanique de l'argile de Ramadan Djamel et les sols reconstitués par la bentonite et traiter par l'ajout des polymères.

La thèse est achevée par une conclusion générale regroupant les résultats obtenus sur la stabilisation des sols gonflants traités par différents polymères, ainsi que quelques perspectives pour poursuivre la recherche dans cet axe

Chapitre 1 : Les sols argileux

1.1 Introduction

Les argiles sont formées par l'assemblage de particules de taille inférieure à 2 μm chargées négativement comme la Smectite, l'Illite et la Kaolinite. La présence de tels minéraux rend l'argile fortement sensible aux molécules polaires d'eau.

Cette sensibilité se traduit par le gonflement et/ou le retrait du sol. C'est la variation de la teneur en eau qui est le facteur déclenchant des variations de volume. Une augmentation de la teneur en eau entraîne le phénomène de gonflement tandis que sa diminution induit le phénomène de retrait.

La variation du volume des argiles est fortement influencée par les facteurs microscopiques et macroscopiques. A l'échelle microscopique, ces facteurs sont complexes et dépendent principalement des propriétés minéralogiques des matériaux argileux et des propriétés chimiques du fluide hydratant. A l'échelle macroscopique, ils dépendent des liaisons électriques entre les particules.

1.2 Minéraux argileux

Tous les minéraux argileux sont composés par l'assemblage, en réseau cristallin, d'eau (H_2O), de silice, sous forme de silicates (SiO_3) et d'aluminium, sous forme d'alumine (Al_2O_3). Leur structure élémentaire, appelée feuillet, est constituée d'un arrangement de deux cristaux de base : silicates et alumines. Chaque minéral argileux est composé d'un empilement de feuillets.

Ce dernier a un nombre variable de couches pouvant être regroupées en deux types :

Le tétraèdre de silice SiO_4 (Te) : est composé de 4 atomes d'oxygène disposés au sommet d'un tétraèdre régulier enserrant un atome de silicium. Les tétraèdres se combinent entre eux pour former des couches planes dites couches tétraédriques



Figure 1 Structure élémentaire tétraédrique

L'octaèdre d'alumine $\text{Al}_2(\text{OH})_6$ est éventuellement de magnésium $\text{Mg}_3(\text{OH})_6$ (Oc) est composé de 6 ions hydroxydes enserrant un atome d'aluminium ou de magnésium.

Les octaèdres se combinent également pour former des couches planes dites couches octaédriques

Le feuillet élémentaire se compose d'un empilement de 2 ou 3 unités de base. Les liens covalents et les liaisons ioniques assurent l'assemblage des feuillets élémentaires.

Les forces de liaison entre feuillets sont principalement :

- Les forces d'attraction moléculaires qui sont des liaisons faibles
- Les liaisons Hydrogène qui apparaissent avec des atomes fortement électronégatifs, comme l'oxygène.
- Les substitutions isomorphes qui consistent en le remplacement de certains cations constitutifs du réseau cristallin par d'autres de moindre valence. Ce dernier phénomène crée des déficits de charge qui affaiblissent les forces ioniques de liaison entre les feuillets (Remplacement d'un ion Si^{4+} par un ion Al^{3+} dans la couche octaédrique d'aluminium).

Les particules sont donc soumises à un ensemble de forces d'attraction et de répulsion qui varient avec la teneur en eau et dépendent des substitutions isomorphes. Malgré la simplicité apparente de la structure des argiles, on en compte un grand nombre d'espèces, qui se distinguent par les défauts liés aux substitutions isomorphes au moment de la formation.

1.2.1 La Kaolinite

Le feuillet élémentaire $(\text{Si}_4\text{O}_{10})\text{Al}_4(\text{OH})_8$ est composé d'une couche de silice et d'une couche d'alumine. Entre différents feuillets de kaolinite, le contact se fait entre un plan contenant les ions hydroxyles. OH^- de l'octaèdre, et celui contenant les ions d'oxygène O^{2-} du tétraèdre. Dans ce cas, les liaisons interfolées résultent de l'effet composé de liaisons hydrogène et de forces de Van Der Waals, ce qui se traduit par un lien assez fort. Ainsi une particule de kaolinite sera constituée, par exemple, de quelques centaines de feuillets et pourra avoir une épaisseur de quelques dizaines de micromètres. Ces particules sont stables et leur structure élémentaire n'est pas affectée par la présence d'eau .

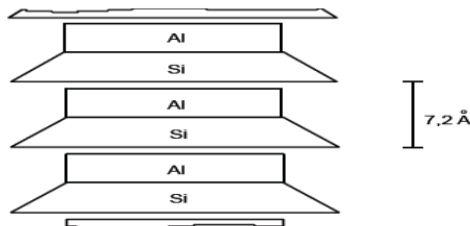


Figure 2 Structure Particulaire de la Kaolinite

1.2.2 L'Illite

Le feuillet élémentaire $(K, H_2O)_2 Si_8 (Al, Fe, Mg)_{4,6} O_{20} (OH)_4$ est composé d'une couche d'alumine comprise entre deux couches de silice. Dans les couches de silice, un ion Si^{4+} sur quatre est remplacé par un ion Al^{3+} . La charge qui en résulte est compensée par les ions potassium K^+ qui assurent des liaisons assez fortes entre les feuillets.

La particule d'Illite comportera, par exemple, une dizaine de feuillets et pourra avoir une épaisseur de quelques centièmes de micromètres. L'espace créé à l'intérieur du feuillet de silice est occupé par un ion K^+ qui, par sa présence, induit un lien fort entre les couches. (Robert. A et D. Fabre.1987).

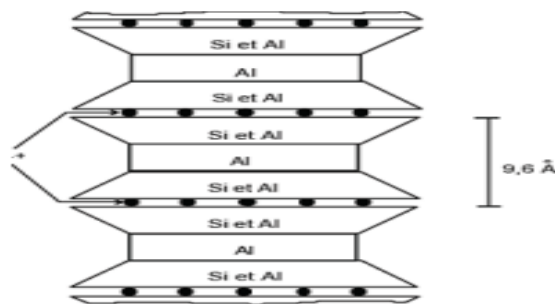


Figure 3 Structure Particulare de L'Illite

1.2.3 La Montmorillon

Le feuillet élémentaire $(OH)_4 Si_8 (Al^{3+} + 10/3 Mg^{2+/3}) O_{20}, n H_2O (6)$ est composé, comme pour l'Illite, d'une couche d'alumine comprise entre deux couches de silice. Un ion Al^{3+} est remplacé par un ion Mg^{2+} dans les couches d'alumine (Fig. I-5). Le déficit de charge qui en résulte est compensé par des ions Ca^{2+} (montmorillonite calcique) ou par des ions Na^+ (montmorillonite sodique). La valence des ions sodium étant plus faible que celles des ions calcium. C'est la montmorillonite sodique qui aura la plus grande surface spécifique et la plus grande C.E.C. Les liaisons entre Feuilletes étant très faibles, ces argiles sont très sensibles à la teneur en eau et ont un fort potentiel de gonflement. L'épaisseur d'une particule de montmorillonite peut- être très faible puisque, contrairement à autres argiles, on peut isoler un feuillet élémentaire. La montmorillonite fait partie de la famille plus générale des smectites définies comme argiles gonflantes.

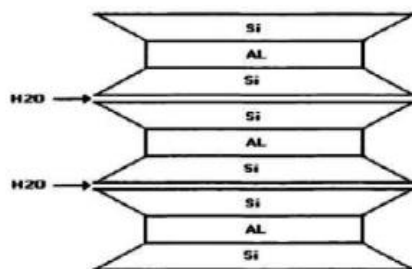


Figure 4 Structure Particulaire de la Montmorillonite

1.2.4 Chlorite

L'espace interfoliaire des chlorites est occupé par un feuillet d'hydroxydes de magnésium ou d'aluminium chargé positivement $(OH)_4(Si\ Al)_8(Mg, Fe)_6O_{20}$ (figure 2.6). L'épaisseur du feuillet atteint 14 Å.

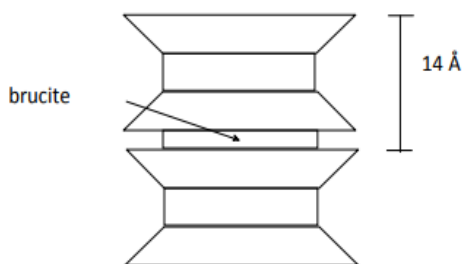


Figure 5 Structure de la particule de chlorite

Les caractéristiques de ces argiles sont résumées dans le tableau 1.

Tableau 1 Comparaison entre les différentes familles d'argile

Minéral	Feuillet	Epaisseur du feuillet (Å)	Cations adsorbés en compensation	Capacité d'échange cationique (centimole/kg)	Expansion à l'humidité	Surface spécifique (m ² /g)	Charge des couches par formule
Kaolinite	TO	7	sans	3-15	faible	5-20	Neutre
Smectite	TOT	10-21	Ca ²⁺ , Na ⁺ hydratés entre feuillets et externe	80-150	élevée	700-800	Négative, faible charge (0,2 à 0,6)
Illite	TOT	10	K ⁺ non hydratés entre feuillets et externe	10-40	faible	100-200	Négative, forte charge (0,8 à 0,9)
Chlorite	TOT	14	Mg ²⁺ externe	10-40	faible	5-20	Positive

1.3 Le gonflement des argiles

L'analyse minéralogique précédente montre que certaines argiles, pour lesquelles les liaisons foliaires sont très faibles, ont la propriété de fixer les molécules d'eau entre deux feuillets voisins. C'est le cas des smectites telles que la montmorillonite, et des chlorites.

L'eau pénètre à l'intérieur des particules et s'organise en couches monomoléculaires. Il s'agit alors d'un gonflement interfoliaire. Il intervient à l'échelle la plus petite de la structure argileuse mais peut présenter une ampleur très importante.

En dehors de ce cas particulier, qui définit les argiles dites "gonflantes", le gonflement est interparticulaire. C'est-à-dire que l'eau ne pénètre pas à l'intérieur des feuillets d'argiles.

Elle agit sur les particules solides. C'est le gonflement interparticulaire. Celui-ci a une ampleur assez limitée, mais affecte tous les types d'argiles.

1.4 Mécanismes de gonflement

Les matériaux susceptibles de gonfler sous l'action de l'eau sont les sols argileux naturels, les marnes, les roches argileuses et les roches composées d'anhydrite. Le processus de gonflement du taux d'absorption de l'eau. Il met en jeu séparément ou de façon combinée des phénomènes physico-chimiques et mécaniques variés. Il dépend aussi de la texture du matériau. C'est-à-dire de l'organisation des plaquettes entre elles.

1.5 Causes et conséquences du gonflement

Les argiles gonflantes se trouvent dans des régions arides ou semi-arides et dans des zones tempérées. Ces sols sont toujours dans un état sec ou très peu humide du fait de la position de la nappe phréatique. Dans certaines régions on assiste à deux saisons bien distinctes, l'une pluvieuse et l'autre sèche. En période sèche le matériau se fissure et présente des polyèdres.

Dans de nombreux pays du monde, le gonflement est à l'origine de fréquents désordres des ouvrages légers. Aux Etats-Unis d'Amérique les dommages provoqués par le gonflement des sols présentent un coût supérieur à celui de toutes les catastrophes naturelles.

En Algérie l'urbanisation de certains quartiers des villes et la construction des routes se heurtent aux problèmes que pose le phénomène de gonflement.

1.5.1. Causes du gonflement

Pour que le gonflement d'un sol se produise, il faut que des « minéraux expansifs » puissent entrer en contact avec de l'eau. En effet toutes les observations ayant portées sur les conséquences présumées du gonflement d'un sol, qu'il s'agisse de la construction de tunnels, d'habitats ou de voiries, ont abouti à la formation de cette équation

« Minéraux expansifs + eau = gonflement »

Quand un ouvrage est mis en contact avec des terrains expansifs, les désordres qui peuvent l'affecter ou après sa construction et qui sont attribués au caractère gonflant des terrains encaissants résultent d'un changement de teneur en eau de ces terrains et trouvent généralement leur origine dans l'une ou l'autre des causes suivantes :

- ✓ L'ouvrage est construit dans une région à saison constatées (saison sèche- saison humide, en région tropicale par exemple)
- ✓ La méthode d'exécution ou de confortement de l'ouvrage utilisant l'eau.
- ✓ Lors des travaux de construction d'un tunnel par exemple, la ventilation est supprimée, ce qui a pour effet d'augmenter la teneur en eau de l'air ambiant.
- ✓ Des canalisations sont rompues ce qui fait que l'eau s'infiltré dans les terrains gonflants.
- ✓ La construction d'un ouvrage proche perturbe l'écoulement des eaux souterraines.
- ✓ Des travaux de drainage contribuent au retrait des sols gonflants.
- ✓ Des mesures d'imperméabilisation ne sont pas prises, ce qui contribue à rendre les terrains sensibles aux variations saisonnières (alternance saison sèche -saison humide).

L'évacuation ou l'évaporation de l'eau contenue dans les sols gonflants est brusquement empêchée alors que les apports d'eau à ses sols ne sont pas limités, ce qui a pour effet d'augmenter leur teneur en eau.

1.5.1 Conséquences du gonflement

Les désordres provoqués par le gonflement affectent généralement les constructions apportant de faible contrainte sur le sol support. La pathologie dépend du type d'ouvrage.

Nous ne traiterons ici que le cas des bâtiments légers, des chaussées et des travaux souterrains.

1.5.1.1 Cas des bâtiments

Les bâtiments, et particulièrement les maisons individuelles construits sans précautions sur sols gonflants, présentent souvent des figures de dégradation telles que fissures des murs porteurs, voire des murs de remplissage, bombement de l'éventuel radié... qui conduisent parfois à l'instabilité générale du bâtiment par rupture ou déboisement de ses éléments porteurs.

Ces désordres résultent du caractère différentiel que prennent les mouvements du sol de fondation (terrassement ou gonflement) sollicitant la structure en flexion ou en cisaillement (Figure 2.6). Ces différences relatives de mouvement proviennent par ailleurs de l'hétérogénéité des sols de fondation, de celle des forces appliquées par la structure sur le sol, ainsi que des

perturbations hydriques que le bâtiment peut engendrer (Mouroux et al. ,1987). Les dégâts causés aux structures des bâtiments reposant sur des sols gonflants aux U.S.A (1976) ont été chiffrés à environ 2.25 milliards de dollars. La figure (6) illustre différent type de dégâts Causés à un bâtiment qui repose sur un sol sujet au gonflement ou au retrait. (Mouroux Pet al 1988).



Figure 6 Formes de dégâts sur des bâtiments reposant sur des terrains gonflants (Mouroux Pet al 1988).

1.5.1.2 Cas des voiries et réseaux divers

Les dommages touchent également les voiries et réseaux divers. Les réseaux de drainage peuvent par exemple subir des inversions de pente qui provoquent le débordement des drains alimentant de cette façon le phénomène de gonflement.

Les routes non conçues pour les sols gonflants peuvent facilement être détruites par enchaînement des phénomènes d'évaporation de l'eau, de retrait des sols, de fissuration d'infiltration de l'eau à travers les fissures, puis de gonflement plus en profondeur...

1.5.1.3 Cas des chaussées

Le gonflement peut provoquer des désordres importants à la structure de la chaussée.

Ce phénomène est causé par des variations de teneur en eau du sous-sol. D'après Jennings 1962, il peut être attribué au climat et à la surcharge. D'autres auteurs signalent que sur les routes d'importance moyenne en Grèce malgré le renouvellement d'asphalte il y a apparition de divers types de fissures. Les désordres subits par la chaussée se résument (figure 7) (Ferrah. F. 2006).



Figure 7 Fissuration longitudinale de routes due au retrait et gonflement des sols (Ferrah. F. 2006).

1.6 Conclusion

Les matériaux argileux, que ce soit les sols ou les roches, sont très fréquents et couvrent une partie considérable du globe terrestre. Leur comportement mécanique est fortement influencé par des paramètres qui permettent d'estimer les tassements, la compressibilité ou la consolidation et la résistance au cisaillement. La maîtrise du phénomène de gonflement demande de grandes connaissances afin de minimiser les dégâts occasionnés par ce phénomène sur les différents ouvrages construits sur les sols argileux gonflants.

Chpitre 2 : Les polymères

2.1 Introduction

Ce chapitre a pour objet une présentation des principales généralités sur les polymères et leur utilisation.

Le mot polymère vient du grec « polus » plusieurs et « meros » parties soit « plusieurs parties », c'est un matériau constitué de macromolécules formées de l'enchaînement covalent d'un très grand nombre d'unités moléculaires de base de répétition qui dérivent d'un ou de plusieurs monomères (qui sont également appelés motifs) et préparées à partir de monomères.

Les polymères sont synthétisés chimiquement à partir du pétrole, mais également du charbon, du gaz naturel et du bois ou d'autres substances végétales

Pour leur composition chimique leurs propriétés uniques dans le monde : rigidité, souplesse ou élasticité, résistance mécanique et chimique sont très utilisés dans le monde. Les polymères sont devenus indispensables et leur production annuelle mondiale, dépasse 1,5 million de tonnes en 1950 à plus de 350 millions de tonnes aujourd'hui (ETP polychimical Skikda) est toujours en croissance continue.

Le comportement mécanique des matériaux est caractérisé par le type et l'amplitude de leur réponse aux forces extérieures appliquées et aux déformations en résultant. Pour les matériaux polymères, ces réponses dépendent fortement de la température, mais aussi de la vitesse et de l'intensité du chargement.

2.1 Différents types de polymères

On peut classer les polymères selon l'origine, le type d'architecture, la structure chimique des motifs ou le types de polymérisation, comme base de la classification.

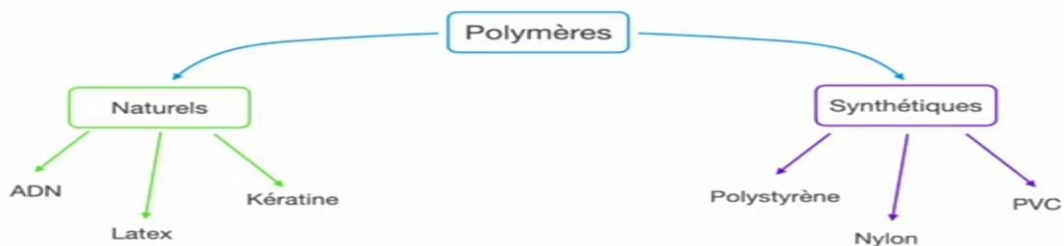


Figure 8 Différent type de polymères (Différents types de matières plastiques, "[http:// : cap-sciences.net/upload/differents_plastiques](http://cap-sciences.net/upload/differents_plastiques)).

2.2 Classification selon l'origine

Les polymères classés selon l'origine peuvent être :

Des polymères naturels : ce sont des composés organiques formant la matière vivante, comme les protéines ADN, Latex, Kératine, les acides nucléiques, la cellulose, la chitine...ect.

Des polymères obtenus par modification chimique d'un polymère naturel, exemple : méthylcellulose.

Des polymères synthétiques : ce sont les matières plastiques, les élastomères, les fibres, les adhésifs. (*Polymere" microsoft 2007. [Cd]. Microsoft corporatio*)

2.3 Classification selon l'architecture

Les architectures macromoléculaires peuvent être divisées en quatre grandes familles : (*F. Moingeon ,2006*) et (*D. A. Tomalia et al,2001*), les polymères linéaires, ramifiés, réticulés et plus récemment, les polymères dendritiques.

2.3.1 Les polymères d'architecture linéaire

Sont essentiellement obtenus par des techniques de polymérisation en chaîne (« vivante », depuis de nombreuses années, ou radicalaire contrôlée, plus récemment) ou des réactions de polymérisation par étapes ou polycondensation (entre monomères strictement di fonctionnels).

2.3.2 Les architectures ramifiées

Découlent de réactions de transfert de chaîne, ou bien sont générées par des réactions de greffage. Dans tous les cas, ces architectures linéaires ou ramifiées définissent le domaine des thermoplastiques. Le Nylon, le Plexiglas (polymères linéaires), dont la production a débuté dans les années 1930, ou bien le polyéthylène basse densité (polymère branché), produit à partir des années 1960, sont des exemples de thermoplastiques.

L'introduction de liaisons covalentes entre chaînes de polymères linéaires ou ramifiés aboutit à la troisième famille.

2.3.3 Les polymères réticulés ou « crosslinked polymères »

Paul Flory a étudié le premier ces nouvelles architectures dès le début des années 1940. Elles définissent aujourd'hui le domaine communément appelé des thermodurcissables. Les résines époxy et les caoutchoucs sont des exemples de systèmes polymères réticulés. -Les systèmes dendritiques constituent la quatrième famille d'architecture macromoléculaire. C'est Paul Flory en 1953 qui a le premier évoqué la possibilité de synthétiser des dendrimères à partir de monomères multifonctionnels, dans son célèbre livre "Principles of Polymer Chemistry"

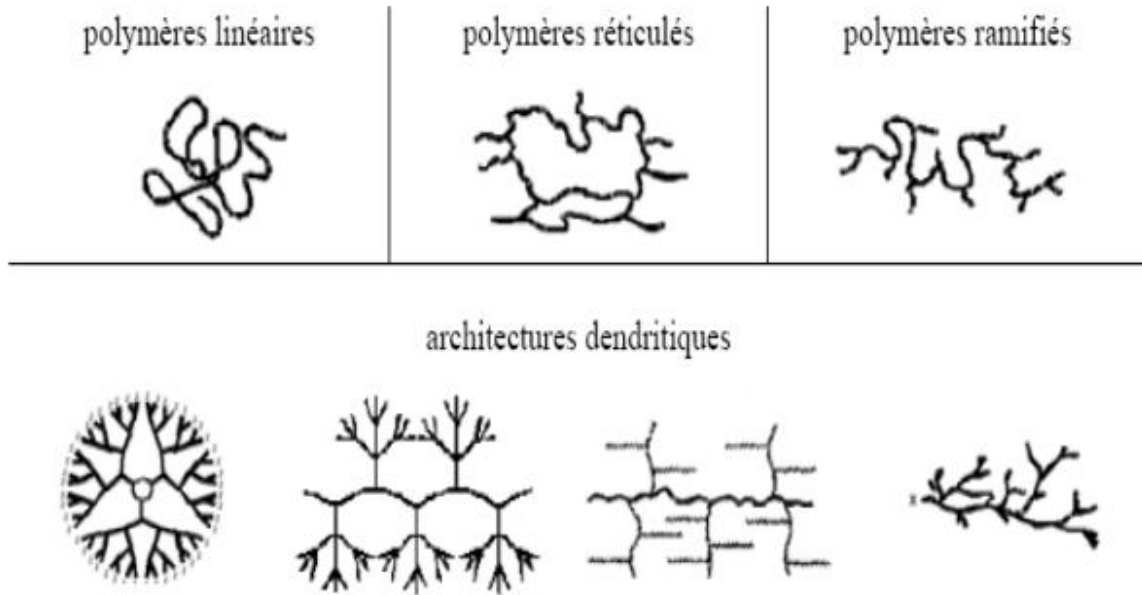


Figure 9 Classification des architectures macromoléculaires selon TAMOLIA (D. A. Tomalia et al,2001).

2.4 Classification selon la structure chimique

La structure chimique des motifs permet une classification des composés macromoléculaires en homopolymères et copolymères.

2.4.1 Les homopolymères

Ce sont des polymères qui ne possèdent qu'une seule unité, ces **homopolymères** sont des longues chaînes formées par la répétition d'un monomère, leurs propriétés mécaniques, écoulement à l'état fondu, optique, sont dues à la structure chimique des monomères et à la longueur des chaînes (Buhleier et al,1978).

Il existe au sein des homopolymères différentes familles, on trouve : les homopolymères linéaires, branchés et étoilés.

2.4.2 Les copolymères

Les copolymères sont des polymères qui possèdent plusieurs unités, comme pour les homopolymères, les copolymères peuvent se classer dans différentes familles, citons : le mode statistique, alterné, séquencé et greffé.

2.5 Classification selon le comportement thermique

Les polymères sont souvent classés d'après leurs propriétés thermodynamiques en trois types :

2.5.1 Les thermoplastiques

Les thermoplastiques ramollissent sous l'effet de la chaleur, ils deviennent souples, malléables et durcissent à nouveau quand on les refroidit, ces matériaux conservent leurs propriétés et ils sont facilement recyclables. Leurs polymères de base sont constitués par des macromolécules linéaires reliées par des liaisons faibles qui peuvent être rompues sous l'effet de la chaleur ou de fortes contraintes, elles peuvent alors glisser les unes par rapport aux autres pour prendre une forme différente et quand la matière refroidit, les liaisons se reforment et les thermoplastiques gardent leurs nouvelles formes (*Tomalia et al, 1985*)

2.5.2 Les thermodurcissables

Les thermodurcissables sont les produits dont la transformation conduit, par une réaction chimique, à des composés macromoléculaires tridimensionnels qui sont des matières thermodurcies ou thermorigides. Dans ce cas les chaînes de départ sont beaucoup plus courtes et plus réactives, ces chaînes vont se lier ensemble chimiquement, cette réaction conduit à des liens chimiques rigides et met en jeu toutes les molécules présentes pour former un réseau tridimensionnel (*S. Jouenne, 2005*).

2.5.3 Les élastomères

Les élastomères présentent les mêmes qualités élastiques que le caoutchouc, un élastomère au repos est constitué de longues chaînes moléculaires repliées sur elles même, sous l'action d'une contrainte, les molécules peuvent glisser les unes par rapport aux autres et se déformer (*Différents types de matières plastiques, "http://: cap-sciences.net/upload/differents_plastiques*).

2.6 Utilisation des polymères

Les polymères possèdent des propriétés qui ne dépendent pas seulement de la constitution chimique et du poids moléculaire, mais encore du degré de cristallinité (et par conséquent, de la densité). Il existe donc, dans la plupart des cas, une gamme de propriétés correspondant à la gamme de densité existantes. La répartition des poids moléculaires peut aussi affecter les propriétés du polymère. En particulier les polyéthylènes avec une répartition serrée de poids moléculaires possèdent une résistance plus grande à la fragilité à basse température et à la fissuration due aux efforts des agents extérieurs.

Les polymères ne sont pas seulement des matériaux de commodité, mais aussi des matériaux pour des technologies avancées.

- Polymères optiques et photoniques.
- Composites polymères et cristaux liquides.
- Polymères conducteurs.
- Fibres de haut module mécanique.
- Polymères photomobiles
- Polymères auto-réparables.

Patrice HAMELIN le 10 août 2010 a conclu que les matériaux composites FRP ou PRF associent les matrices polymères thermodurcissables ou thermoplastiques à des fibres d'origine textile en verre, carbone, aramide. Leurs propriétés mécaniques et, plus particulièrement leurs résistances en traction, ou leurs résistances ou rigidités spécifiques (rapport entre résistance ou module d'élasticité et densité) sont particulièrement performantes par rapport à l'acier. La stabilité physico-chimique des matrices polymères et une très bonne tenue à la fatigue des fibres permettent de concevoir des armatures de renforcement pour le béton armé, des câbles et haubans plus durables et d'un poids propre plus faible pour les ouvrages d'art. (*Patrice HAMELIN, 2010*).

Gilbert, et al, 2020, ont orientés en priorité vers ces matériaux, dans l'électrotechnique comme dans bon nombre d'autres domaines (constructions aéronautique et automobile, bâtiment...). Au sein même des systèmes électriques, les fonctions qu'ils assurent et les contraintes qu'ils doivent endurer en complément de l'isolation électrique sont très variables. La résistance des matériaux organiques à ces diverses contraintes étant elle-même très variable selon leur nature et leur formulation, il en résulte une multitude de possibilités offertes dans laquelle il est effectivement difficile d'identifier les solutions optimales (*Gilbert TEYSSÉDRE et al, 2020*)

Les cinq familles les plus utilisées sont : Les polychlorures de vinyles (PVC) sont utilisés comme pièces rigides, tuyauterie, films d'étanchéité, les polypropylènes (PP) et les polystyrènes (PS) : pièces rigides, fibres, les polyesters saturés : cosmétiques, revêtements de surface, peintures, vernis, plastifiants pour autres polymères ; et les polyesters insaturés : films, fibres textiles, matériaux composites, les polyuréthanes (PU), les élastomères, qui proviennent pour certains de ces différentes familles et ou du caoutchouc naturel, et dont la principale utilisation se trouve dans le domaine des pneumatiques.



Figure 10 Des objets plastiques d'usage courant (Différents types de matières plastiques, "http://: cap-sciences.net/upload/differents_plastiques).

Tableau 2 Exemples de monomères et des polymères correspondants (Yueo Zha, 2008).

éthylène	$\text{CH}_2 = \text{CH}_2$	polyéthylène (PE) $-(\text{CH}_2 - \text{CH}_2)_n$
tétrafluoroéthylène	$\text{CF}_2 = \text{CF}_2$	polytétrafluoroéthylène (PTFE) $-(\text{CF}_2 - \text{CF}_2)_n$
propylène	$\text{CH}_2 = \overset{\text{CH}_3}{\underset{ }{\text{CH}}}$	polypropylène (PP) $-(\text{CH}_2 - \overset{\text{CH}_3}{\underset{ }{\text{CH}}})_n$
chlorure de vinyle	$\text{CH}_2 = \overset{\text{Cl}}{\underset{ }{\text{CH}}}$	polychlorure de vinyle (PVC) $-(\text{CH}_2 - \overset{\text{Cl}}{\underset{ }{\text{CH}}})_n$
styrène	$\text{CH}_2 = \overset{\text{C}_6\text{H}_5}{\underset{ }{\text{CH}}}$	polystyrène (PS) $-(\text{CH}_2 - \overset{\text{C}_6\text{H}_5}{\underset{ }{\text{CH}}})_n$
acrylonitrile	$\text{CH}_2 = \overset{\text{CN}}{\underset{ }{\text{CH}}}$	polyacrylonitrile (PAN) $-(\text{CH}_2 - \overset{\text{CN}}{\underset{ }{\text{CH}}})_n$
méthacrylate de méthyle	$\text{CH}_2 = \overset{\text{CH}_3}{\underset{\text{O} = \text{C} - \text{O} - \text{CH}_3}{\text{C}}}$	polyméthacrylate de méthyle (PMMA) $-(\text{CH}_2 - \overset{\text{CH}_3}{\underset{\text{O} = \text{C} - \text{O} - \text{CH}_3}{\text{C}}})_n$

2.7 Traitement des sols par des polymères

Une qualité significative de recherche se concentre sur le traitement des sols par polymère :

(Nwankow K N, et al, 2001), a étudié l'évaluation de l'influence des polymères organiques connus pour augmenter la stabilité des agrégats sur la résistance au cisaillement du sol près de la surface et le détachement du sol par des gouttes de pluie uniques au cours du temps. Il a conclu que les produits de transformation formés lors de la décomposition du LEV et du SGP provoquaient des changements temporels dans le sol auxquels le dispositif suédois à cône de chute était insensible, mais influençaient la réponse du sol à détachement de gouttes de pluie (Nwankow K N, 2001).

Liu J, et al, 2009, Ont montré que les stabilisateurs de sol aqueux améliorent les propriétés du sol. La stabilité à l'eau des agrégats du sol a été déterminée à l'aide de deux stabilisateurs de sol différents : le type S et le type E. Diverses concentrations des deux stabilisateurs de sol ont été testées dans des agrégats de sol de plus de 5 mm mais de moins de 10 mm. L'essai des agrégats à l'aide de la méthode de mesure statique de l'eau a montré que l'indice de stabilité à l'eau, K, augmentait avec les concentrations de stabilisateurs de sol. Le stabilisateur de sol de type S à des concentrations comprises entre 20 % et 40 % a donné des valeurs K comprises entre 64,0 % et 83,8 %, et les émulsions de polymère de type E à des concentrations comprises entre 3 % et 7 % ont donné des valeurs K comprises entre 90,1 % et 99,7 % respectivement. Les agrégats de sol mélangés avec de l'eau ont donné une valeur K de 11,5 %, qui a été testée comme témoin (Liu J et al,2009).

Fatemeh Mousavi, et al, 2014, ont étudié les effets du RPP en tant que stabilisant polymère pour contrôler le gonflement des sols expansifs, ils ont montré que le traitement du sol avec RPP a entraîné une amélioration du CBR et de la densité sèche maximale et une réduction des limites d'Atterberg, du potentiel de gonflement et de la pression de gonflement. Les résultats ont également indiqué que les périodes de durcissement de 7 à 14 jours n'avaient aucun effet significatif sur la plasticité et les propriétés de gonflement des échantillons traités (Fatemeh Mousavi et al,2014)

(Christopher M Geiman, 2005), Il a travaillé sur :

- Les stabilisants traditionnels à base de chaux et de ciment étaient beaucoup plus efficaces que les stabilisants liquides (lignosulfonate, polymère synthétique et chlorure de magnésium) pour augmenter la résistance.
- Les stabilisants liquides étaient inefficaces sur les sols à forte teneur en humidité.
- Le stabilisateur cimentaire exclusif était plus efficace pour augmenter la résistance que la chaux dans tous les cas testés, mais n'était pas aussi efficace que le stabilisateur ciment.

- La chaux vive et la chaux hydratée augmentaient la maniabilité des sols bien qu'elles ne produisent pas de résistance comparable au ciment.
- La résistance des sols stabilisés avec du ciment et le stabilisateur cimentaire exclusif peut être estimée sur la base du rapport eau-amendement du mélange.
- La résistance des sols stabilisés avec de la chaux peut être estimée sur la base d'une combinaison de l'indice de plasticité et du taux d'amendement en eau du mélange.

(*Inyang H et al, 2007*). Ont étudié l'influence de trois polymères : la carboxyméthyl cellulose sodique (CMC), le polyacrylamide (PAM), l'oxyde de polyéthylène (PEO) dont la concentration varie, en tant qu'agents de stabilisation du sol contre le gonflement de Na-montmorillonite, les résultats montrent que ces polymères sont efficaces pour la réduction de taux de gonflement volumétrique VSR jusqu'à 40 % par rapport à l'eau distillée.

(*L. Hammadi et al, 2014*), ont indiqué que l'influence de l'oxyde de polyéthylène (PEO) sur le taux de cisaillement, et sur les propriétés rhéologiques des suspensions de bentonite est étudiée, dont l'ajout d'oxyde de polyéthylène (PEO) de 0 et 2% dans 4% de bentonite augmente la limite élastique et de l'indice de consistance de la bentonite et diminue l'indice d'écoulement de la bentonite. Aussi une augmentation des propriétés viscoélastiques de la bentonite .

(*Rehab Bekkouche. S et al, 2016*), ont utilisé des polymères PVC et HDPE dans des sols argileux pour déterminer leur influence sur les propriétés physiques et mécaniques du matériau sol-polymère en fonction du temps, ce qui devrait assurer une période de vie optimale les résultats ont montré que le traitement du sol avec du PVC et du PEHD entraînait une amélioration du CBR et de la densité sèche maximale ainsi qu'une réduction des limites d'Atterberg, du potentiel de gonflement et de la pression de gonflement.

(*J. de GEOMATE, 2014*), a montré l'effet des nanocomposites sur l'argile gonflante, ce dernier influe positivement sur la réduction du potentiel de gonflement et l'amélioration des propriétés géotechniques de l'argile gonflante.

(*Souhila Adjabi et Mohamed Salah Nouaouria, 2017*), ont conclu que le renforcement des sols affaissable par des inclusions de fibre de polyéthylène et des fibres de Sisal réduit le potentiel d'affaissement des sols.

2.8 Conclusion

Il demeure essentiel de mieux maîtriser l'économie des plastiques en évitant qu'en fin de vie, ils soient dispersés dans l'environnement ou brûlés. Le recyclage est de loin la meilleure utilisation. Dans ce cadre, l'insertion des plastiques dans les matériaux de construction devrait être étudiée avec attention : en effet, ces matériaux sont, en quantité, les plus utilisés sur notre

planète, les matériaux polymères sont généralement utilisés pour leurs propriétés mécaniques particulières et leur aptitude à être mis en œuvre. Cependant, il est important de souligner que quel que soit ces applications, le comportement des polymères est fortement influencé par le phénomène de l'interaction sol- structure.

**Chpitre 3 : Traitement des sols argileux
gonflants**

3.1 Introduction

Le gonflement des sols est généralement accompagné d'un changement de leurs caractéristiques mécaniques et physico-chimiques, ce qui peut avoir une influence sur la durée de vie de l'ouvrage. Les conséquences du gonflement sont nombreuses et dépendent principalement du type d'ouvrage, technique de construction et potentiel de gonflement.

L'eau influence considérablement les sols à grains fins et en particulier les argiles. La variation de la teneur en eau se traduit par une augmentation de la plasticité et les limites d'Atterberg constituant les bornes de cette influence.

Grâce à l'ajout de matériaux stabilisants, les caractéristiques des différents types des sols peuvent être améliorées considérablement. Mais à chaque type de sol, correspond le stabilisant approprié. La stabilisation est pratiquée de très longue date mais c'est à partir des années 1920 que fut développée une approche scientifique, avec un cumul de recherches dans les années 1940 à 1960 qui perpétuent de nos jours.

Le choix de l'une de ces méthodes de stabilisation, dépend de plusieurs paramètres tels que ; les considérations économiques, la nature du sol à traiter, la durée de l'opération, la disponibilité des matériaux à utiliser ainsi que les conditions d'environnement.

Le présent chapitre, dresse un état de l'art des techniques de stabilisation avec les différents ajouts utilisés dans le domaine de la stabilisation des sols gonflants en générale et les polymères en particulier.

3.2 Stabilisation par l'ajout de différents types de matériaux

3.2.1 Stabilisation par l'ajout de déchets de marbre

La poudre de déchets de marbre (MWP) a été utilisée comme additif dans le processus de stabilisation des sols gonflants. Des échantillons de sol ont été traités avec de la poudre de déchets de marbre à trois concentrations différentes (10%, 20% et 30%). L'ajout de la poudre de déchets de marbre (MWP) aux sols naturels a entraîné une diminution des propriétés de compressibilité et une augmentation de la résistance au cisaillement, de la cohésion (C) et de l'angle de frottement (Φ) (D. Saxena, 2017).

Grâce à un processus d'échange de cations, l'ajout de poussière de marbre a permis d'améliorer les performances dans les sols gonflants. L'augmentation de la performance globale est due à la présence d'ions Ca^{2+} supplémentaires. La poussière de marbre en différents pourcentages (3 %, 6 %, 9 %, 12 % et 15 %) et durées de cure (3, 7 et 14 jours) ont été utilisés pour améliorer les performances des sols gonflants. Au cours de la période de durcissement de 14 jours, la

résistance à la compression non confinée est passée de 99,2 kN/m² à 286,5 kN/m². En outre, pour une augmentation de 9 % de la poussière de marbre, le CBR est passé de 5,19 % à 8,83 % (H.A. Abdelkader et al, 2021).

D'après ces recherches, la plasticité des sols expansifs a typiquement diminué, en raison du remplacement des particules argileuses par de l'agrégation et des particules de sable non plastiques. En outre, une augmentation de la densité sèche maximale a été enregistrée ; cette augmentation est attribuée à une diminution du taux de vide et à une amélioration de la gradation du sol. L'augmentation de la résistance du sol est également observée de manière continue avec l'ajout de poussière de marbre. L'amélioration maximale de la résistance est signalée avec 20 % de poussière de marbre, tandis qu'une diminution est observée par la suite. Par conséquent, la teneur optimale en poussière de marbre doit être considérée comme étant de 20 % en termes de résistance du sol. Cependant, la teneur optimale en poussière de marbre peut dépendre des propriétés du sol. Par conséquent, l'utilisation de la poussière de marbre est fortement recommandée pour les pratiques de stabilisation des sols. En outre, la poussière de marbre est un produit résiduel, de sorte que son utilisation pour la stabilisation des sols est l'une des alternatives respectueuses de l'environnement pour les applications durables d'amélioration des sols.

3.2.2 Traitement des sols à la chaux

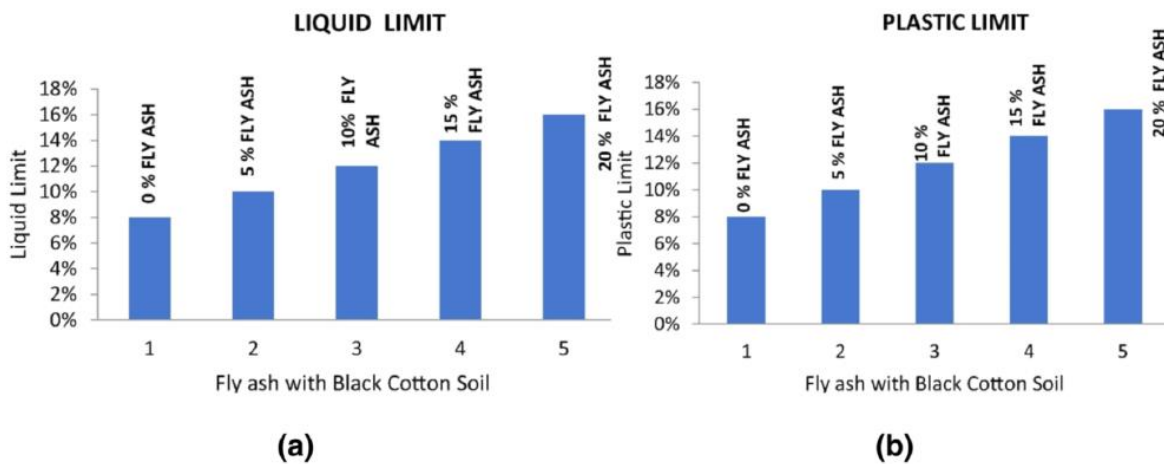
La technique de stabilisation par la chaux permet de améliorer les diverses qualités techniques du sol, pour réaliser un meilleur matériau de construction. L'avantage de la stabilisation du sol est une augmentation de la résistance, de la durabilité et de la rigidité du sol, ainsi qu'une diminution de la plasticité du sol et de son éventuel gonflement/rétrécissement (Bishnoi, 2019). À des températures élevées, le calcaire se décompose pour produire de la chaux (J.A. Oke, M.K. Olowoyo, 2019). Il existe donc trois types de chaux qui peuvent être utilisés pour assainir le sol : la chaux vive (oxyde de calcium, CaO), la chaux hydratée (hydroxyde de calcium, Ca [OH]₂), la chaux vive (oxyde de calcium, Ca[OH]) et la chaux hydratée (oxyde de calcium, Ca[OH]) et la boue de chaux hydratée. Le carbonate de calcium (calcaire, CaCO₃) est chimiquement converti en oxyde de calcium pour produire de la chaux vive. En outre, la réaction chimique entre la chaux vive et l'eau produit de la chaux hydratée. La chaux hydratée crée des liaisons cimentaires robustes lorsqu'elle est combinée à des particules d'argile (P. Indiramma et al, 2019, G. Sahu et al, 2017). Il a été démontré que la chaux augmente la teneur en eau optimale du sol, la limite de retrait et la résistance du sol, tout en diminuant le potentiel de gonflement, la limite

de liquidité, l'indice de plasticité et la densité sèche maximale du sol (J. Diana et al, 2017). Elle augmente la capacité du sol à être compacté et manipulé (A. Jemal et l,2019).

La réponse au gonflement-retrait et les propriétés de résistance d'un sol expansif ont été étudiées en utilisant différentes concentrations d'un stabilisateur commun, la chaux. Les résultats de l'étude ont démontré que l'ajout d'une concentration appropriée de chaux à un sol expansif réduisait le gonflement libre différentiel, minimisait la limite de liquidité et améliorait la résistance à la compression non confinée (S.Rehab Bekkouche,2022)

3.2.3 Stabilisation par l'ajout des cendres volantes

Suite à la revue de la littérature (Darikandeh et al,2020), (Naji et al 2020),(J.P. Sahoo, P.K. Pradhan,2010), les propriétés des sols gonflants ont été expressément affectées par les cendres volantes. Pour une meilleure compréhension, la limite de liquidité et la limite plastique ont été significativement modifiées par les cendres volantes, ce qui montre le réajustement des particules de sol après le traitement aux cendres volantes. La résistance à la compression non confinée, ainsi que la densité sèche, se sont également améliorées de manière remarquable avec l'augmentation de la teneur en cendres volantes, ce qui montre l'adéquation des cendres volantes pour la pratique de stabilisation des sols expansifs. En général, il a été découvert que les cendres volantes améliorent efficacement les propriétés géotechniques des sols gonflants (Figure 3.1). En outre, en raison de leur disponibilité, les cendres volantes constituent une option rentable pour la stabilisation des sols gonflants.



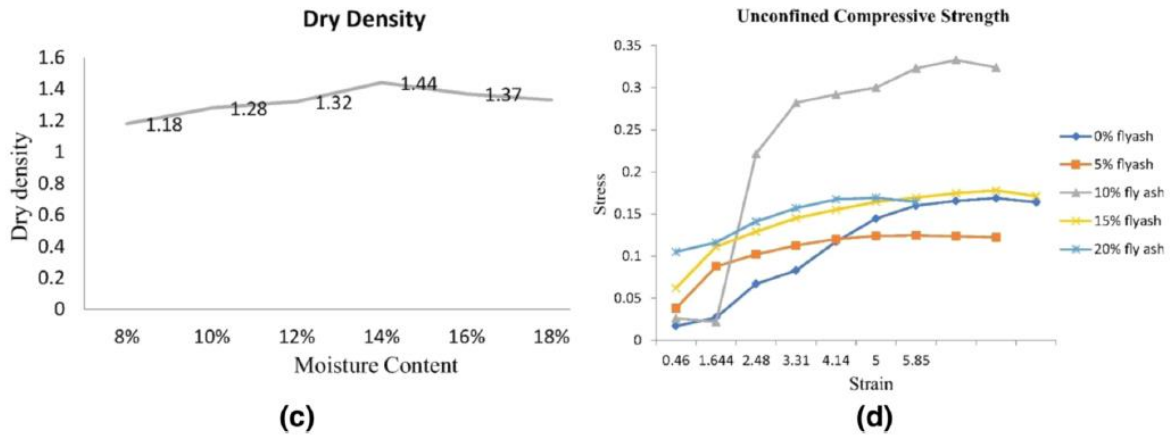


Figure 11 . (a) Variation du L.L. du sol avec les cendres volantes. (b) Variation de la densité du sol en fonction des cendres volantes. (c) Variation de la densité sèche du sol avec les cendres volantes. (d) Variation de la résistance à la compression non confinée du sol avec les cendres volantes (Naji et al 2020).

3.2.4 Stabilisation par l'ajout de la poudre de coquille d'œuf

Une expérience a été menée pour étudier l'impact de la poudre de coquille d'œuf sur la stabilisation des sols gonflants. Le sol étudié a été mélangé avec différents mélanges de chaux et de poudre de coquille d'œuf à une concentration de chaux de 4 % et trois ratios différents de poudre de coquille d'œuf (0,5 %, 1 % et 2 %). Les études ont montré que la plasticité était diminuée, et la résistance initiale et différée était augmentée. En outre, avec un ajout de 2% de poudre de coquille d'œuf, la résistance du sol est passée de 171,87 kPa à 213,86 kPa après 28 jours de cure. La plasticité a chuté de 21,46% à 13,93% pour la poudre de coquille d'œuf, qui était de 2% (Oluwatuyi et al,2018).

3.2.5 Stabilisation par l'ajout de la poudre de marbre

L'influence de la poudre de marbre sur la limite liquide, la limite plastique, l'indice de plasticité, la densité sèche, la teneur en eau optimale et les valeurs CBR est étudiée en l'ajoutant à des sols gonflants originaux dans la gamme de 0-60% par une augmentation de pourcentage de 10%, 20%, 30%, 40%, 50 % et 60 %. L'étude expérimentale a consisté à analyser initialement les qualités des sols gonflants originaux obtenus dans différentes régions, ainsi que de la poudre de marbre recueillie dans les mêmes endroits pour modifier le sol. Les résultats des expériences ont révélé que la poussière de pierre a un impact significatif sur les propriétés techniques des sols expansifs (P. Indiramma et al ,2020).

3.2.6 Stabilisation par les Fibres naturelles

Le renforcement des sols avec des fibres végétales est une étape majeure dans la transition vers l'utilisation d'éco-matériaux dans la construction durable (*Tiwari et al, 2021*).

En outre, des études ont été menées pour étudier l'effet des fibres végétales sur les propriétés de compactage, et ont trouvé une réduction de la densité sèche maximale et une augmentation de la teneur en eau optimale avec l'ajout de fibres pour des pourcentages de 0,5 et 2 % dans la matrice du sol (*Maity, J et al , 2011*).

L'utilisation de fibres de Diss montre des améliorations significatives dans la plasticité et les propriétés techniques des sols gonflants. Les résultats montrent une modification significative des paramètres de cisaillement, de cohésion (réduction de 60% à 10% de fibres) et d'angle de frottement (augmentation de 35% à 10% de fibres) du sol traité. Les essais de compressibilité à l'œdomètre montrent une diminution de l'indice de gonflement (réduction de 86% à 10% de fibres), de l'indice de compressibilité (réduction de 28% à 10% de fibres) et de l'angle de friction (augmentation de 35% à 10% de fibres), la pression de préconsolidation (réduction de 43% à 10% de fibres). L'ajout de fibres de Diss a fondamentalement changé le comportement du sol . (*Khelifi et al, 2018*), ont étudié la biodégradation dans le sol des feuilles de *Stipa tenacissima* (Alfa). Des essais mécaniques non linéaires ont été réalisés à différents stades de la biodégradation. Les résultats ont montré que la résistance à la traction, le chargement et le déchargement, le module d'Young et l'énergie de dissipation diminuent avec le temps d'enfouissement, tandis que la plasticité augmente. Cette perte de résistance est corrélée à la dégradation rapide de la cellulose.

3.2.7 Stabilisation des sols gonflants par les polymères

Les développements technologiques actuels en matière de stabilisation et de renforcement des sols s'orientent vers des solutions techniques plus économes et plus respectueuses de l'environnement.

De nombreux travaux de recherche ont été effectués en vue d'étudier l'influence des polymères sur les propriétés des argiles gonflantes.

Nous signalerons quelques exemples d'utilisation de ces produits servant à la stabilisation des sols argileux gonflants :

(*Rehab. B. S and Boukhatem. G, 2016*), ont proposé d'utiliser deux types de polymères, le PVC et le PEHD comme ajouts dans le sol gonflant pour déterminer leur influence sur ses propriétés

physiques et mécaniques. Les différents tests de cette étude sont : les limites d'Atterberg, le compactage standard le CBR et le potentiel de gonflement, effectués sur des échantillons de sol témoins et traités avec différents pourcentages de polymère (PVC et PEHD) (0%, 3% et 6%). Les résultats ont montré que le traitement du sol avec le PVC et l'PEHD, a entraîné une amélioration du CBR (Figures 12 et 13.) et de la densité sèche maximale et une réduction des limites d'Atterberg, du potentiel de gonflement et de la pression de gonflement. Les auteurs ont constaté une amélioration des caractéristiques de résistance au cisaillement avec l'ajouts des deux types de polymères. Aussi l'ajout d'un petit pourcentage de polymère provoque initialement à ($t = 0$ sec) une déformation instantanée, suivie d'une déformation dépendante du temps.

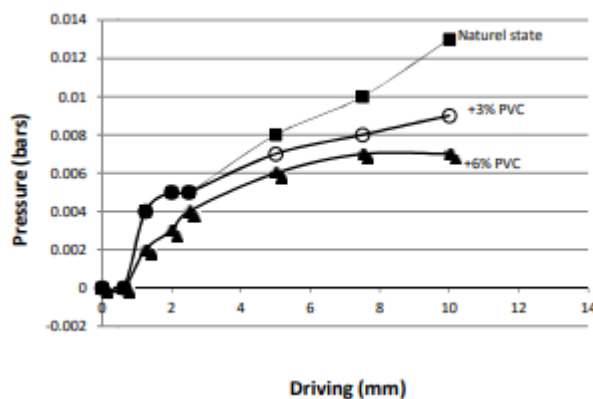


Figure 12 /Effet de PVC sur le CBR [20]

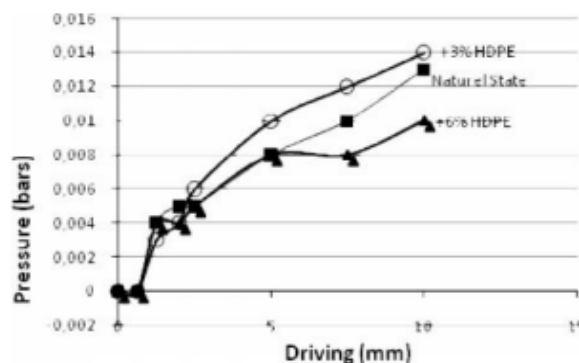


Figure 13 Effet de PEHD sur le CBR [20]

Hilary I. I and al, 2007 . Ont étudié les interactions physicochimiques entre les molécules de polymère et les particules des argiles gonflantes. Les solutions aqueuses des trois polymères utilisés comme ajout de stabilisations sont : carboxyméthyl cellulose de sodium (CMC), polyacrylamide (PAM), oxyde de polyéthylène (PEO) dans des concentrations allant de 0.5 à 10 g/L. Les résultats montrent que le PAM, le polymère cationique, réduit le taux de gonflement

volumétrique VSR jusqu'à 40 % par rapport à l'eau distillée. Les auteurs ont trouvé que les résultats des essais de diffraction des rayons X et de tests de sorption sur des échantillons séchés de Na-montmorillonite indiquent que des espacements intercouches de postsorption/gonflement de 0.74 et 0.78 nm pour le PAM A (poids moléculaire = 4×10^6) et le PAM B (poids moléculaire = 7×10^6) respectivement, sont obtenus grâce à la fixation des molécules de PAM dans l'espace intercalaire d'argile pendant la sorption à une concentration aqueuse de 4 g/L. Sans dire que pour le CMC (le polymère anionique) et le PEO (le polymère neutre), le gonflement n'est pas significativement réduit par rapport à celui de l'eau distillée.

D'autres chercheurs, ont testé une série de stabilisants traditionnels et non traditionnels sur trois mauvais sols. Les stabilisants sélectionnés étaient : la chaux vive, la chaux hydratée, la chaux en granulés, le ciment, le lignosulfonate, le polymère synthétique, le chlorure de magnésium et un stabilisant cimentaire exclusif. Les conclusions tirées de cette recherche montrent que les stabilisants traditionnels à base de chaux et de ciment étaient bien plus efficaces que les stabilisants liquides (lignosulfonate, polymère synthétique et chlorure de magnésium) en termes de résistance croissante et que les stabilisants liquides étaient inefficaces sur les sols à forte teneur en humidité.

Une autre étude (*Zana Taher, 2020*) a pour but la réduction du gonflement du sol par les polymères disponibles, la chaux vive et les cendres volantes de classe C. Ils ont utilisé quatre polymères disponibles dans le commerce et ont comparé leurs résultats avec ceux de la chaux et les cendres volantes. Les résultats indiquent que pour le sol non traité, le traitement aux polymères est moins efficace pour réduire le potentiel de gonflement (réduction de 70 %) et augmenter la résistance à la compression non confinée (augmentation de 46 kPa) d'un sol très expansif par rapport à la chaux (réduction de 100 %, augmentation de 1260 kPa) et aux cendres volantes. Les auteurs ont constaté que les polymères réduisent le gonflement dans les sols expansifs par des mécanismes différents de ceux de la chaux et des cendres volantes.

Dans un but d'étudier et comprendre l'influence du Poly Vinyle Acétate (PVA) sur les propriétés géotechniques des sols expansifs, (*Magdi. M. E et al, 2019*) ont proposé quatre pourcentages différents de PVA (0 %, 1.5%, 3.75%, et 5%). Ils ont constaté que le PVA avait un effet significatif sur les propriétés du sol traité. Une augmentation de la teneur en PVA a entraîné une augmentation de la résistance à la compression non confiné du sol. L'ajout de 3.75% de PVA a augmenté la valeur de résistance à la compression non confinée d'environ 6

fois de celle du sol naturel. Les valeurs des indices de plasticité et de gonflement libre ont été réduites de 62 % à 0% et de 190% à 50% respectivement par ajout de 5% de PVA.

Les résultats des essais de cette étude sont présentés dans le tableau 3.

Tableau 3 Résultats des essais pour le sol traité avec le PVA (Magdi. M. E et al, 2019)

Propriétés des sols	PVA			
	0%	1.5%	3.75%	5%
Limite de liquidité (%)	78	75	73	70
Limite de plasticité (%)	16	28	43	70
Indice de plasticité (%)	62	47	30	0
Indice de gonflement libre (%)	190	110	70	50
Résistance à la compression non confiné (kPa)	178	941	1304	236
Densité maximale sèche (kN/m ³)	17.7	19.2	19.7	17.1
Teneur en eau maximale (%)	22.1	19	17	17.4

Dans une autre étude, le but était l’investigation de l’effet d’un produit chimique sur les sols gonflants en utilisant le polymère polyméthacrylate (PMA). (Qassun. S. M. S et Safa. H. H, 2018) ont préparé en laboratoire le sol gonflant par ajout de bentonite et ont suivi un programme expérimental pour estimer les effets de l’ajout du polymère (PMA) sur les propriétés du sol gonflant préparé. Les résultats des essais ont indiqué que l’ajout des polymères PMA a provoqué une diminution de la limite de liquidité (LL), de l’indice de plasticité (IP), de l’indice de gonflement libre et des propriétés de compressibilité (Figure 14.).

Ainsi que la période de durcissement améliore la résistance à la compression non confinée pendant 21 jours de 200,84 kPa pour 0 % de PMA à 440,18 kPa pour 7% de PMA. La valeur du CBR augmente avec l’ajout de 7% de PMA où sa valeur est passée de 5,3 à 19.

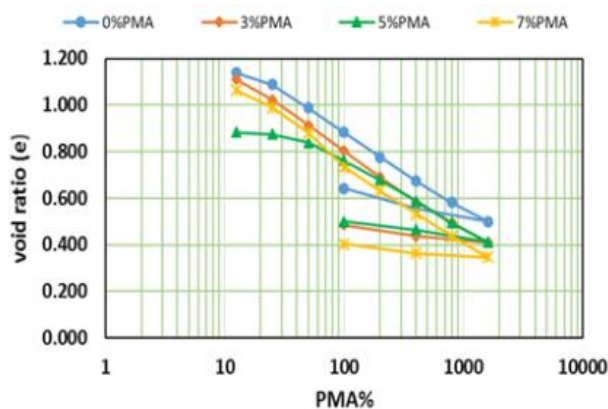


Figure 14 Test de consolidation pour différents taux de PMA (Qassun. S. M. S et Safa. H. H, 2018)

3.3 Conclusion

En examinant les résultats de ces études faites sur la stabilisation des sols gonflants par les différents types de matériaux, on peut dire qu’il est nécessaire de regarder l’effet de l’interaction

sols- ajouts sur le comportement physico-chimique et mécanique de ces derniers, et de chercher à mettre au point une base de données plus complète concernant la performance des solutions techniques pour résoudre le problème de gonflement des sols, ces bases de données doivent être prise en considération dans les études et l'élaboration des projets dans le domaine de la géotechnique.

Chapitre 4 : Essais expérimentaux

4.1 Introduction

Le problème du gonflement des sols est un danger sérieux pour les bâtiments et spécifique à certains sols argileux. (La structure du sol, la densité, La teneur initiale) sont des facteurs qui peuvent affecter considérablement la pression de gonflement ou les déformations de argiles gonflantes. Ces phénomènes sont plus prononcés lorsqu'ils se produisent dans des régions où se produisent des variations climatiques importantes, en particulier de forts gradients de l'évaporation et les déficits saisonniers d'humidité. Les problèmes de gonflement du sol sont particulièrement évidents dans les cas suivants : régions arides et semi-arides qui sont caractérisées par de longues périodes de sécheresse de courtes périodes de précipitations .

En Algérie, plusieurs cas de troubles très dommageables, liés à ce problème, touchent principalement les structures construites en surface (bâtiment, fondation superficielle, structure de soutènement, remblais, etc.) .

Afin d'améliorer le comportement des sols expansifs, les ingénieurs géotechniciens demandent l'aide de la pédologie et la géologie. Aujourd'hui, une littérature détaillée est disponible, et une recherche mondiale sur la stabilisation des sols expansifs à l'aide d'un large éventail de matériaux classiques et émergents progrès *k. Yan et al, (20009), X. Lefebvre, (2002)*. Le compactage simple réduit la porosité du sol en expulsant l'air emprisonné. Les caractéristiques de compactage sont déterminées par l'essai normal de Proctor, qui sont les teneurs en eau et la densité sèche maximale, ces données sont utilisées et appliquées dans des études de stabilisation des sols à problèmes sur le site. Un grand nombre de chercheurs et de scientifiques ont concentré leurs efforts sur le gonflement des argiles et les méthodes et techniques des appareils qui ont été mis au point, l'influence de l'efficacité d'une solution ou d'un produit sur la stabilisation et l'amélioration du comportement d'un sol gonflant *Jin Liu et al (2011)* , American association for state highway and transportation officiails (aashto).(1990).D'autres chercheurs ont étudié l'effet de différents types de polymères dans des solutions aqueuses *Waseim Ragab Azzam. (2014), M A. Mohsin and n. F. Attia, (2015)*. Ces analyses évaluent souvent le potentiel des polymères pour une utilisation comme abat-poussières, les agents anticorrosion et les inhibiteurs de fissures dans les matériaux de barrière de confinement des déchets. La sorption et l'interaction entre les molécules aqueuses et les surfaces argileuses ont également été étudié. Ce travail présente une étude expérimentale de l'utilisation de plusieurs types de polymère avec différents taux et de différentes formes et tailles, afin d'évaluer leurs effets sur les propriétés de plasticité des sols gonflants, l'état de mélange des sols à différents niveaux de bentonite (6 %, 12 %, 20 % et 25 %) a été étudié en analysant la variation des propriétés des mélanges.

La première partie expérimentale est destinée pour la classification du sol d'étude qui comprend : la détermination de valeur au bleu de méthylène, l'analyse granulométrique par sédimentation ainsi que la teneur en eau et la densité sèche, ces essais sont complétés par la détermination des limites d'Atterberg (les limites de plasticité, de liquidité, l'indice de plasticité). Ensuite, la deuxième partie qui représente l'essai Proctor normal afin d'identifier la teneur en eau optimale (W_{opt}) et la densité sèche max (γ_{max}) pour chaque traitement, le CBR, l'essai de cisaillement rectiligne et l'essai Œdométrique afin de déterminer l'indice de compressibilité (C_c), la pression de consolidation (P_c) et l'indice de gonflement (C_g), cette procédure expérimentale est basée sur une méthodologie générale suivante :

4.2 Matériaux utilisés

4.2.1 Le sol naturel

L'étude expérimentale est effectuée sur un sol de la région de Skikda situé à proximité de la commune de Ramdan Djamel (Figure 15.). Le sol a été extrait à une profondeur d'environ 3,5m à 4m. Après l'extraction, le sol a été placé dans des sachets en plastique et transporté au laboratoire pour préparation et exécution des essais géotechniques d'identification et de caractérisation.

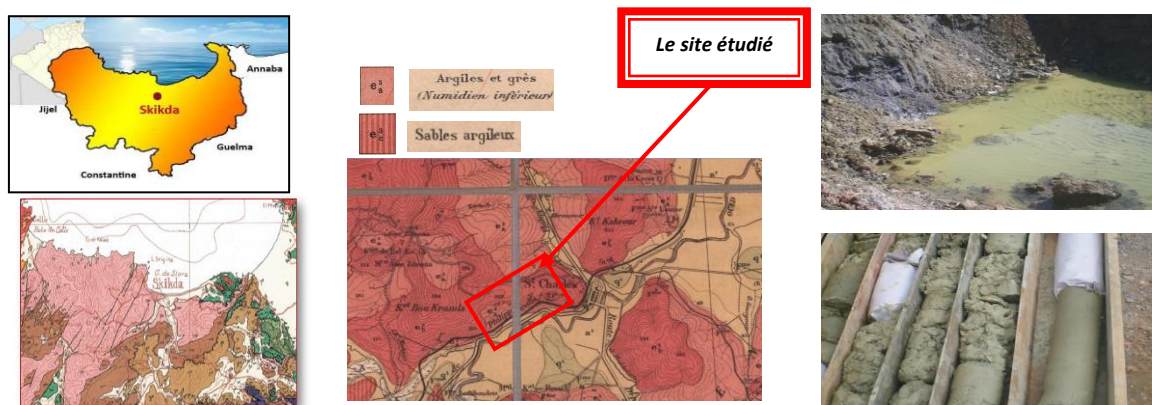


Figure 15 Zone de prélèvement des échantillons

4.2.2 La bentonite de Meghnia

Un matériau argileux à usage industriel, essentiellement composés de montmorillonite. Les propriétés de gonflement et de perméabilité des bentonites dépendent étroitement de la nature du cation compensateur. Il existe une certaine diversité parmi les matériaux commercialisés sous le terme de bentonite, dont les performances, vis à vis de la fonction d'étanchéifiassions dépendent de :

- La teneur en montmorillonite présente dans le produit ;
- La concentration relative de la bentonite en sodium et en calcium ;
- La finesse de mouture qui a une conséquence indirecte sur l'activité de la bentonite : à poids égal, une bentonite fortement broyée a une surface d'exposition supérieure et s'hydrate plus rapidement que la bentonite plus grossière ;
- Des additifs chimiques éventuellement introduits lors de la fabrication du matériau commercialisé.



Figure 16 La Bentonite Meghnia

Tableau 4 Les propriétés de la bentonite

Propriétés	Valeur
Humidité (%)	<12
Granulométrie des éléments fins (%)	95
Teneur en eau (%)	9
Taux de gonflement (mL/g)	25-27
Limite de liquide (%)	181
Limite plastique (%)	30
Indice de plasticité (%)	151
Résistance aux chocs (kg /cm ³)	40
MgO ₃ (%)	1
Na ₂ O (%)	4
CaO (%)	2
Fe ₂ O ₃ (%)	3
Al ₂ O ₃ (%)	19
SiO ₂ (%)	58
Autres minéraux (%)	13
PH	5

4.2.3 Le PVC (Polychlorure de Vinyle)

C'est un polymère thermo-plastique de grande consommation, amorphe ou faiblement cristallin, connu généralement sous le sigle PVC (en anglais : polyvinyl chloride). Il est préparé à partir de deux matières premières : à 57 % de sel et à 43 % de pétrole. Le PVC est la seule matière plastique d'usage courant constituée par plus de 50 % de matière première d'origine minérale existant à profusion dans la nature de formule chimique $-(CH_2-CHCl)_n-$, il est obtenu par polymérisation radicalaire du monomère chlorure de vinyle (sigle VCM, formule $CH_2=CHCl$). Le PVC est un matériau organique.



Figure 17 Le Polychlorure de Vinyle –PVC

Tableau 5 Les propriétés de PVC

Propriétés	Valeurs
Densité (g/cm ³)	1.38
Teneur en eau absorbé (%)	0.2
Résistance (kj/m ²)	8-10
Coefficient d'élasticité en tension (MPa)	2500
Température maximal (C°)	160
Diamètre(m)	5.10 ⁻⁵

4.2.4 Le PEHD (Polyéthylène Haute Densité)

Le polyéthylène haute densité (PEHD) a été synthétisé en 1953 par le chimiste et prix Nobel allemand Karl Ziegler.

Les PEHD peuvent être produits par polymérisation coordinative de type catalyse de Ziegler-Natta ou catalyse avec un métallocène.

Les propriétés des PEHD :

Polyoléfine semi-cristalline

Température maximale d'emploi : 105 °C ; température de fragilisation : -50 °C

Compatible avec les micro-ondes

Bonne flexibilité

Très bonne résistance aux acides, alcools aliphatiques, aldéhydes, hydrocarbures aliphatiques et aromatiques

Faible résistance aux agents oxydants, qui peuvent alors faciliter l'installation d'un biofilm indésirable³.

Il est régénéré et recyclé sous forme de granulés .



Figure 18 Granulé de PEHD

Tableau 6 Propriétés de PEHD

Propriétés	Valeurs
Densité (g/cm ³)	0.95-0.98
Carbon (%)	2.0 -2.5
L'eau absorber (%)	<0.01
Module de Young (GPa)	0.55-1
Conductivité thermique(W/m.K)	0.45-0.52
Température de transition(C°)	1300
Diamètre(m)	1.10 ⁻⁴

4.2.5 Le PEBD (Polyéthylène basse densité)

Le PEBD (LDPE, en anglais : low density polyethylene) est un polyéthylène qui a été inventé en 1933 par les ingénieurs anglais E.W. Fawcett et R.O. Gibson de la firme ICI. Il est considéré comme un matériau « modèle » pour une étude fondamentale. L'étude mécanique se fait couramment à l'aide d'une machine de traction. Elle permet de déterminer plusieurs grandeurs

physiques importantes. Par exemple, le module d'élasticité et la contrainte à la rupture du PEBD sont inférieurs à ceux du PEHD.

Cette polyoléfine est plus souple que le PEHD, mais elle possède une moindre résistance mécanique que le PEHD. Les principales applications du PEBD sont des produits souples : sacs poubelles, films, sachets, récipients souples, etc.

Températures d'utilisation de deux grades de PEBD [entre () pour de courtes durées] : 75 °C (90 °C) (non compatible micro-onde) ; 80 °C (120 °C).

Retrait important (1,5 à 3 %), mais moins élevé que celui du PEHD (1,5 à 4 %) car sa structure est moins cristalline.



Figure 19 Granulé de PEBD

Tableau 7 Propriétés de PEBD

Propriétés	Valeurs
Densité (g/cm ³)	0.92
Carbon (%)	2.0 -2.5
L'eau absorber (%)	<0.015
Module de Young (GPa)	0.1-0.3
Conductivité thermique(W/m.K)	0.33
Diamètre(m)	1.10 ⁻⁴

4.2.6 PET (Polyéthylène Téréphtalate)

Polyéthylène Téréphtalate, couramment appelé PET ou PETE, est un polymère thermoplastique largement utilisé dans l'industrie moderne. Il appartient à la famille des polyesters et est bien

connu pour sa résistance, sa légèreté et sa capacité à former des films transparents. Sa formule chimique est $(C_{10}H_8O_4)_n$. Le PET est résistant à l'eau et à la majorité des solutions chimiques, ce qui lui confère une excellente barrière contre l'humidité. Sont connues pour leur excellente combinaison de propriétés telles que la résistance mécanique, thermique, chimique ainsi que la stabilité dimensionnelle. Sa nature légère le rend pratique pour le transport et réduit l'empreinte carbone lors du transport des produits. Un autre avantage majeur du PET est sa capacité à être recyclé. C'est l'un des rares plastiques qui peut être collecté, recyclé et refondu pour créer de nouveaux produits, réduisant ainsi son impact sur l'environnement.



Figure 20 Granulé de PET

Tableau 8 Propriétés de PET

Propriétés	Valeurs
Densité (g/cm^3)	1.38
Limite d'élasticité (%)	50-150
L'eau absorber (%)	0.16
Module de Young (MPa)	2800-3800
Conductivité thermique ($W/m.K$)	0.15-0.24
Résistance à la traction (MPa)	55-75
Diamètre (m)	8.10^{-5}

4.2.7 Polypropylène PP (polypropylène)

Le polypropylène (ou polypropène) isotactique, de sigle PP et de formule chimique $(-CH_2-CH(CH_3)-)_n$, est un polymère thermoplastique semi-cristallin de grande consommation (bouteille, mobilier, etc.). Sa résistance exceptionnelle à la fatigue. Ce matériau est l'un des matériaux synthétiques les plus largement utilisés pour renforcer le sol en raison de sa non-toxicité, de sa résistance à la corrosion et de sa résistance élevée à la traction.



Figure 21 Polypropylène PP

Tableau 9 Propriétés de PP

Propriétés	Valeurs
Densité g/cm ³	0.905
Limite d'élasticité (%)	50-150
L'eau absorber (%)	0.01-0.03
Module de traction (MPa)	1350-1800
Conductivité thermique (W/m. K)	0.15-0.24
Résistance à la traction (MPa)	31-45

4.3 Programme expérimental

Pour identifier les matériaux utilisés nous avons procédé aux essais suivants sur l'argile de Ramadan Djamel ou les sols reconstitués par la bentonite :

Analyse bleu méthylène : (selon la norme NF P94-068)

Densité sèche et teneur en eau ;

Analyse granulométrique et sédimentométrique NF P 94-056 et NFP 94-057 ;

Les limites d'Atterberg (NF P94-051) ;

Proctor (NF P94 -093) ;

Essai de Cisaillement rectiligne non consolidé non drainé NF P 94-071-1) ;

Essai de compressibilité à l'œdomètre (XP P 94-090-1) ;

Essai de gonflement libre (XP P 94-090) ;

Les essais effectués dans le laboratoire de LNHC de Skikda sont basés sur une méthodologie suivante :

Pour répondre à notre problématique de l'amélioration des propriétés géotechniques de nos sols (sol de Ramadan Djamel et les sols reconstitués par l'ajout de la bentonite (3%, 6%, 12%, 20% et 25%) et ces sols traités par les différents polymères, nous allons suivre une approche expérimentale qui consiste à appliquer différentes proportions des polymères choisis et suivre au même temps l'évolution de ces caractéristiques par rapport à nos valeurs de référence. Le suivi est assuré par la répétition de l'ensemble des tests et essais que nous avons utilisés pour identifier les valeurs de référence. En ce qui concerne la quantité des polymères ajoutés, nous avons utilisé des proportions allant de 3% du poids du sol testé, et 6%, 12% et 20% pour trouver des valeurs optimales pour la lecture.

Les tableaux suivants récapitulent l'ensemble des valeurs utilisées pour les ajouts, que nous présentons leurs résultats dans le chapitre suivant.

Tableau 10 g

Sol	Ajouts				
Argile de Ramadan Djamel	PVC	PP	PEHD	PEBD	PET
100%	0%	0%	0%	0%	0%
97%	3%	3%	3%	3%	3%
94%	6%	6%	6%	6%	6%
88%	12%	12%	12%	12%	12%
80%	20%	20%	20%	20%	20%

Sols		Ajout				
Argile de Ramadan Djamel	Bentonite	PVC	PP	PEHD	PEBD	PET
97%	3%	3%	3%	3%	3%	3%
		6%	6%	6%	6%	6%
		12%	12%	12%	12%	12%
		20%	20%	20%	20%	20%
94%	6%	3%	3%	3%	3%	3%
		6%	6%	6%	6%	6%
		12%	12%	12%	12%	12%
		20%	20%	20%	20%	20%
88%	12%	3%	3%	3%	3%	3%
		6%	6%	6%	6%	6%

		12%	12%	12%	12%	12%
		20%	20%	20%	20%	20%
80%	20%	3%	3%	3%	3%	3%
		6%	6%	6%	6%	6%
		12%	12%	12%	12%	12%
		20%	20%	20%	20%	20%
75%	25%	3%	3%	3%	3%	3%
		6%	6%	6%	6%	6%
		12%	12%	12%	12%	12%
		20%	20%	20%	20%	20%

4.3.1 Essai au bleu de méthylène (NF P94-068)

L'essai au bleu de méthylène, est un essai utilisé en géotechnique pour déterminer la propriété d'un sable, d'un granulat et plus généralement d'un sol, et les différents types d'argiles qu'il contient. L'essai consiste à mesurer la quantité de colorant (bleu de méthylène) fixée par 100 g de la fraction granulaire analysée.

L'essai a été effectué sur d'échantillon sec de fraction de 1mm et de la masse de 50g trempé dans 500ml d'eau déminéralisée et dispersé à l'aide d'un agitateur à ailettes tournant à 700 tr/min pendant au moins 5 minutes ; Pour la suite de l'essai, la vitesse de rotation est maintenue à 400tr/min, Le dosage consiste à injecter successivement des quantités précises de solution de bleu de méthylène dans la suspension jusqu'à atteindre la saturation des particules du sol. Le test à la tache permet de repérer l'instant de cette saturation on prélève pour cela une goutte dans la solution que l'on dépose sur un papier filtre, une tache centrale de couleur bleu se forme et s'entoure rapidement d'une auréole si cette dernière est colorée, le test est positif et l'essai est terminé. On considère que cet essai exprime globalement la quantité et la qualité de l'argile contenue dans un sol. Il s'agit donc d'un autre paramètre permettant de caractériser l'angulosité d'un sol. En pratique, on détermine la valeur de bleu de méthylène à la tâche sur la fraction 0/1 mm, exprimée en grammes de bleu pour 100 g de fines qui est donnée par la formule :

$$VBS = V/M$$

V : Volume du bleu méthylène injecté ;

M : Masse de l'échantillon.

Tableau 11 Classification des sols en fonction de la valeur VBS (Philipponnat 2003)

VBS < 0.1	Sol insensible à l'eau
$0.2 \leq VBS < 1.5$	Sol sablo limoneux, sensible à l'eau
$1.5 \leq VBS$	Sol sablo argileux, peu plastique
$2.5 \leq VBS < 6$	Sol limoneux de plasticité moyenne
$6 \leq VBS < 8$	Sol argileux
VBS > 8	Sol très argileux

*Figure 22 Essai au Bleu de Méthylène*

4.3.2 Teneur en eau W (NF P 94-050)

Le test de la teneur en eau (NF P 94-050) permet la détermination de la quantité d'eau existante dans le sol naturel (échantillon). La teneur en eau est déterminée par la formule suivante :

$$w = \frac{m_w}{m_s} \cdot 100\%$$

M_w : Masse de l'eau dans le sol (échantillon)

M_s : Masse des particules solides du sol (échantillon)

*Figure 23 Préparation de l'essai de la teneur en eau*

4.3.3 Analyse granulométrique : (NF P 94-056)

L'analyse granulométrique permet d'identifier quelle est la fraction ou proportion du sol qui a le plus d'influence sur les propriétés mécaniques et physiques de ce sol. C'est aussi un premier critère de classification des sols qui réside dans la dimension de leurs grains solides qui est mesurée à l'aide de tamis ou passoire.



Figure 24 Préparation de l'essai granulométrique lavage des échantillons

Imbibition de matériau dans l'eau puis le laver sous le tamis 0.08 mm Le refus recueilles dans une assiette est séché puis le verser sur la série de tamis, agiter à la main, enlever les tamis un par un après avoir remanié son contenu avec un pinceau, puis les peser en cumulant les poids. Un mode de représentation commode des résultats de l'analyse granulométrique est la courbe granulométrique. Elle représente pour chaque dimension (%) de particule, le poids (ou masse) (%) des particules de cette taille ou de tailles inférieures. La forme de la courbe granulométrique permet de préciser le degré d'étalement de la granulométrie ou encore son uniformité.

4.3.4 Analyse granulométrique par sédimentation (NF P94-056)

La sédiment métrie est un essai qui complète l'analyse granulométrique par tamisage des sols. Elle s'applique aux éléments de diamètre inférieur à 80 microns.

Les grains de diamètre différent sédimentent dans un milieu liquide au repos à vitesses différentes. La relation entre diamètre des grains et vitesse de sédimentation est donnée par la loi de stocks.

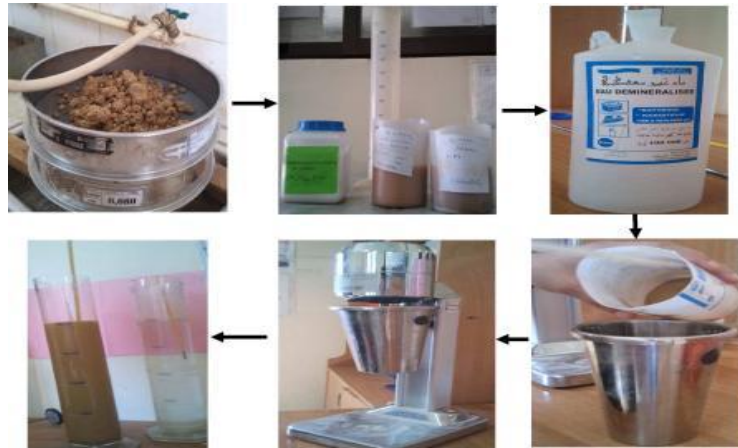


Figure 25 Matériels de l'essai sédimentométrique

4.3.5 Limite d'Atterberg (NF P94-052).

Les limites d'Atterberg, les limites de plasticité ou les limites de consistance sont utilisées pour caractériser le comportement des sols fins, même si leur comportement varie dans le temps. Les limites de l'Atterberg et l'indice de plasticité du sol varie non seulement avec l'importance de sa fraction argileuse mais aussi avec la nature des minéraux argileux et des cations adsorbés.

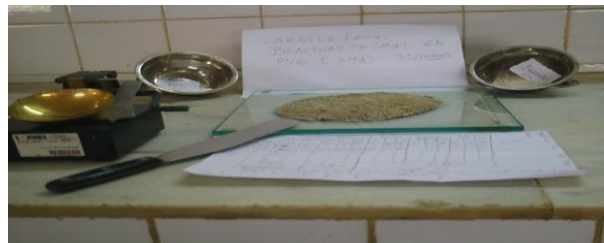


Figure 26 Matériel utilisé dans l'essai de Limites d'Atterberg



Figure 27 Détermination de la limite de liquidité.

4.3.6 Analyse Mécanique : Essai Proctor (NF P94 -093)

Le principe de l'essai consiste à humidifier un matériau à différentes teneurs en eau et à le compacter, pour chacune des teneurs en eau, selon un procédé et une énergie conventionnelle.

Pour chacune des valeurs de teneur en eau considérées, on détermine la masse volumique sèche de matériau et on trace la courbe des variations de cette masse volumique en fonction de la teneur en eau.

D'une manière générale cette courbe, appelée courbe Proctor, présente une valeur maximale de la masse volumique du matériau sec qui est obtenue pour une valeur particulière de la teneur en eau.

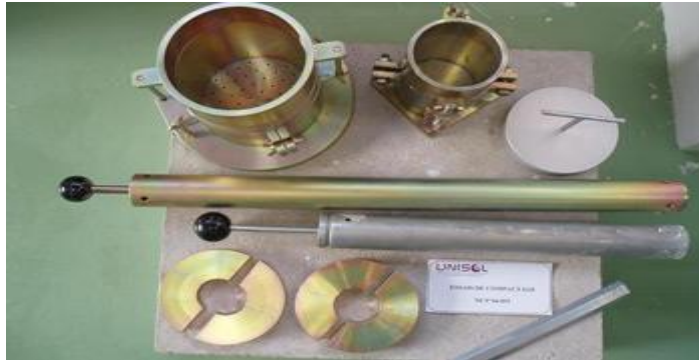


Figure 28 Appareillage nécessaire pour l'essai Proctor

Pour le sol de Ramadan Djamel, on sèche le sol on le passe au tamis de 1mm, une masse de sol de 2500 g, ensuite on le compacte par couche dans un moule cylindrique (moule Proctor), ayant diamètre intérieur de 105 mm et hauteur de 116 mm, au moyen d'un matériau de dimension et de masse normalisée (la dame) que l'on laisse tomber librement d'une hauteur normalisée. La masse volumique sèche de l'échantillon ainsi compacté est déterminée pour chaque teneur en eau. Si le compactage est fait sur les sols reconstitués par la bentonite ou les sols traités par les polymères ont fait les mêmes étapes précédentes mais après un bon mélange du sol avec les ajouts.

4.3.7 Essai de cisaillement rectiligne (NF P 94-071-1)

L'essai s'effectue sur une éprouvette de sol de Ramdan Djamel placée dans une boîte de cisaillement constituée de deux demi- boîtes indépendantes. Le plan de séparation des deux demi - boîtes constitue un plan de glissement correspondant au plan de cisaillement de l'éprouvette. Il consiste à :

- Appliquer sur la face supérieure de l'éprouvette un effort vertical (N) maintenu constant pendant toute la durée de l'essai.
- Produire un cisaillement dans l'éprouvette selon le plan horizontal de glissement des deux demi- boîtes, l'une par rapport à l'autre en leur imposant un déplacement relatif Δl à la vitesse constante.

-Mesurer l'effort horizontal de cisaillement (T) correspondant.

L'essai de cisaillement direct à la boîte s'applique aux sols dont la dimension maximale (D_{max}) des éléments du sol est inférieure à 2 mm Les échantillons ont une section droite carrée de 60 mm * 60 mm et une hauteur de 30 mm. La préparation des éprouvettes commence par le séchage du sol étudié dans une étuve réglée à 105 °C. Les échantillons des mélangés bentonite – polymères sont de l'essai de Proctor.



Figure 29 Boîte de Cisaillement

4.3.8 L'essai Œdométrique : (XP 94-090-01)

Cet essai a pour objet l'étude de la consolidation d'un échantillon de sol intact ou remanié, soumis à une charge vertical constante par paliers, drainé verticalement et entouré latéralement d'une enceinte rigide A partir de cet essai on détermine les caractéristiques suivantes :

- C_c l'indice de compression ;
- C_g l'indice de gonflement ;
- C_s l'indice de recompressions ;
- σ_p la contrainte de pré consolidation du sol.

Cet essai constitue une application directe de la théorie de Terzaghi proposée pour l'étude de la consolidation verticale des sols fins saturés. A partir des résultats de cet essai on procède à l'évaluation de l'amplitude du tassement de consolidation primaire d'une couche de sol compressible ainsi que le temps de consolidation qu'elle nécessite.

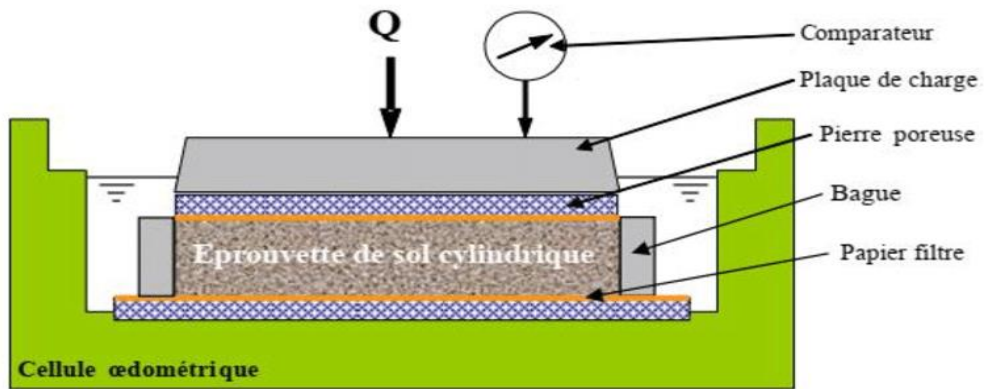


Figure 30 Cellule œdométrique type Terzaghi



Figure 31 Les composants de la cellule œdométrique

4.4 Conclusion

Ce chapitre a été porté sur la présentation des matériaux utiliser dans notre étude : la description technique des polymères utilisés. Le sol de Ramadan Djamel, et la description des essais d'identification et de caractérisation des paramètres des sols de références et sols reconstituer par bentonite, et les sols traiter par polymères.

Chapitre 5 : Résultats et discussions

5.1 Introduction

Dans ce chapitre, on va aborder et présenter les résultats des essais d'identification de l'argile de Ramadan Djamal, ainsi que les résultats des sols reconstitués par la bentonite, et d'évaluer les effets des polymères, selon le programme suivant :

- Etude des mélanges (sol et bentonite) selon les taux de 6% ,12%, 20 et 25% d'ajouts par rapport au poids du sol de référence.
- Etude du mélange du (sol, bentonite) et du PVC avec des taux de 3%, 6%, 12% et 20% par rapport au poids du sol (sol, bentonite) utilisé.
- Etude du mélange du (sol, bentonite) et du PP avec des taux de 3%, 6%, 12% et 20% par rapport au poids du sol (sol, bentonite) utilisé.
- Etude du mélange du (sol, bentonite) et du PEHD avec des taux de 3%, 6%, 12% et 20% par rapport au poids du sol (sol, bentonite) utilisé.
- Etude du mélange du (sol, bentonite) et du PEBD avec des taux de 3%, 6%, 12% et 20% par rapport au poids du sol (sol, bentonite) utilisé.
- Etude du mélange du (sol, bentonite) et du PET avec des taux de 3%, 6%, 12% et 20% par rapport au poids du sol (sol, bentonite) utilisé.

Cette étude est réalisée selon le protocole expérimentale suivant :

- Valeur au bleu de méthylène est effectuée sur le sol non trait et les sols reconstitués par la bentonite et les sols traiter par différents polymères utilisés.
- Les limites d'Atterberg (limite de liquidité, limite de plasticité et l'indice de plasticité).
- Pour déterminer la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale des sols, un test de compactage a été effectué ;
- La différence des valeurs cohésion et angle de frottement des sols traité par PVC, PP et sols non traité a été établie en effectuant l'essai de cisaillement direct ;
- La variation de l'indice de compressibilité et l'indice de gonflement ainsi la contrainte de pré consolidation Ont été déterminé à l'aide de l'essai œdométrique ;

5.2 Propriétés d'identification de l'argile de Ramadan Djamel

5.2.1 Valeur au Bleu de Méthylène

Les résultats de l'essai au bleu ont donné une valeur de VBS = 6.12.

5.2.2 Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique des échantillons testés montre que le sol est constitué d'argile limoneuse et d'argile sableuse limoneuse légèrement graveleuse à graveleuse représentant des granulométries étalées.

5% de Graviers

5% de Gros sable

10% de Sable fin

10% de Limon, et de 70% d'argile.

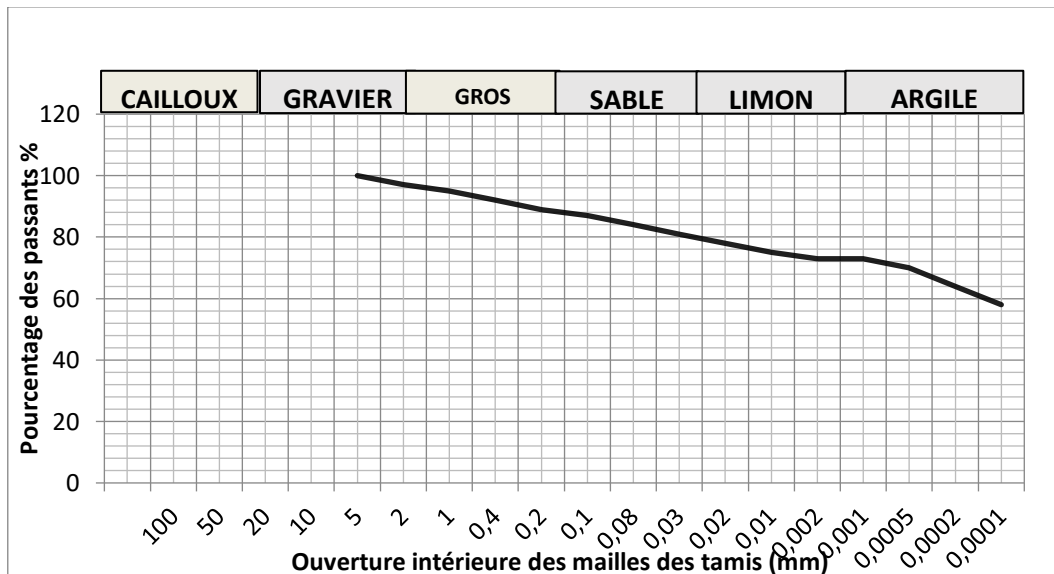


Figure 32 Courbe d'analyse granulométrique et sédimentométrique du sol

5.2.3 Teneur en eau et densité sèche

Dans notre cas, les valeurs de la masse volumique sèche sont comprises entre de $\rho_d = 1.61 \text{ g/cm}^3$ et 1.75 g/cm^3 ; celle des teneurs en eau (w) sont comprises entre 16.80% et 20.63%, caractérisant un sol dense légèrement humide.

5.2.4 Essai de compactage

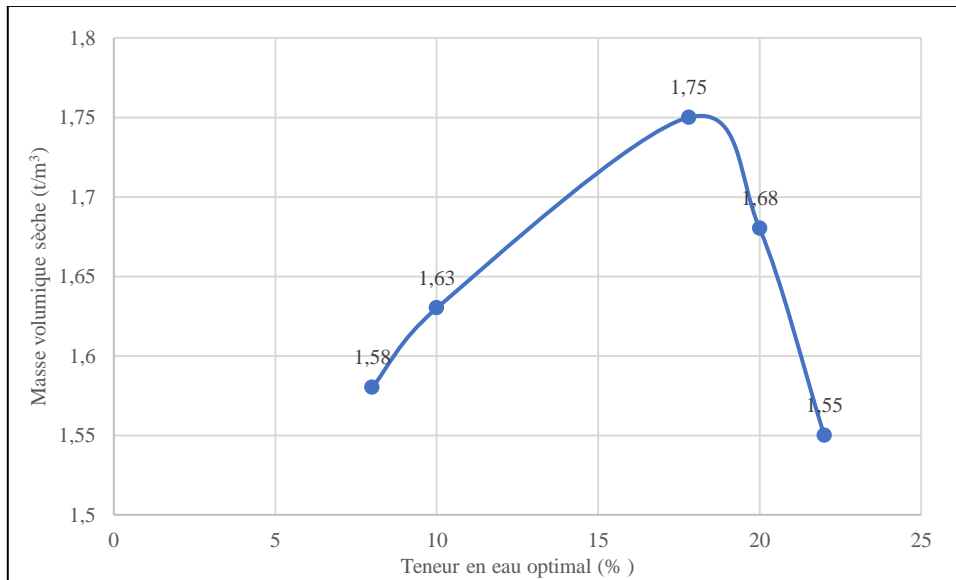


Figure 33 Courbe de compactage pour l'argile de Ramadan Djamel

L'allure de la courbe de compactage dépend de la nature du sol. La masse volumique sèche caractérise le poids d'un volume apparent et permet d'avoir une idée sur le degré de densification des éléments solides de la matrice. La courbe du sol étudié présente une forme aiguë qui montre leur sensibilité à l'eau.

5.2.5 Limites d'Atterberg

Les couples de valeurs de limite de liquidité $W_L=62.84\%$ et de l'indice de plasticité $I_p=31.48\%$ classent les sols testés dans la catégorie des argiles et des limons très plastiques.

D'après l'Abaque de Casagrande, nous constatons que le sol est une argile très plastique ayant les paramètres suivants :

$W_L = 62.84\%$, $W_P = 31.36\%$, $IP = 31.48\%$ et $I_c = 1$.

D'après L'Abaque de Casagrande (Figure 34), $I_p = 31.48\%$, l'argile est très plastique de potentiel de gonflement élevé.

Laboratoire National de l'Habitat et de la Construction

Unité Oued Smar - TEL/FAX : 021.51.61.53 - TEL: 021.51.62.62 - 021.51.33.30

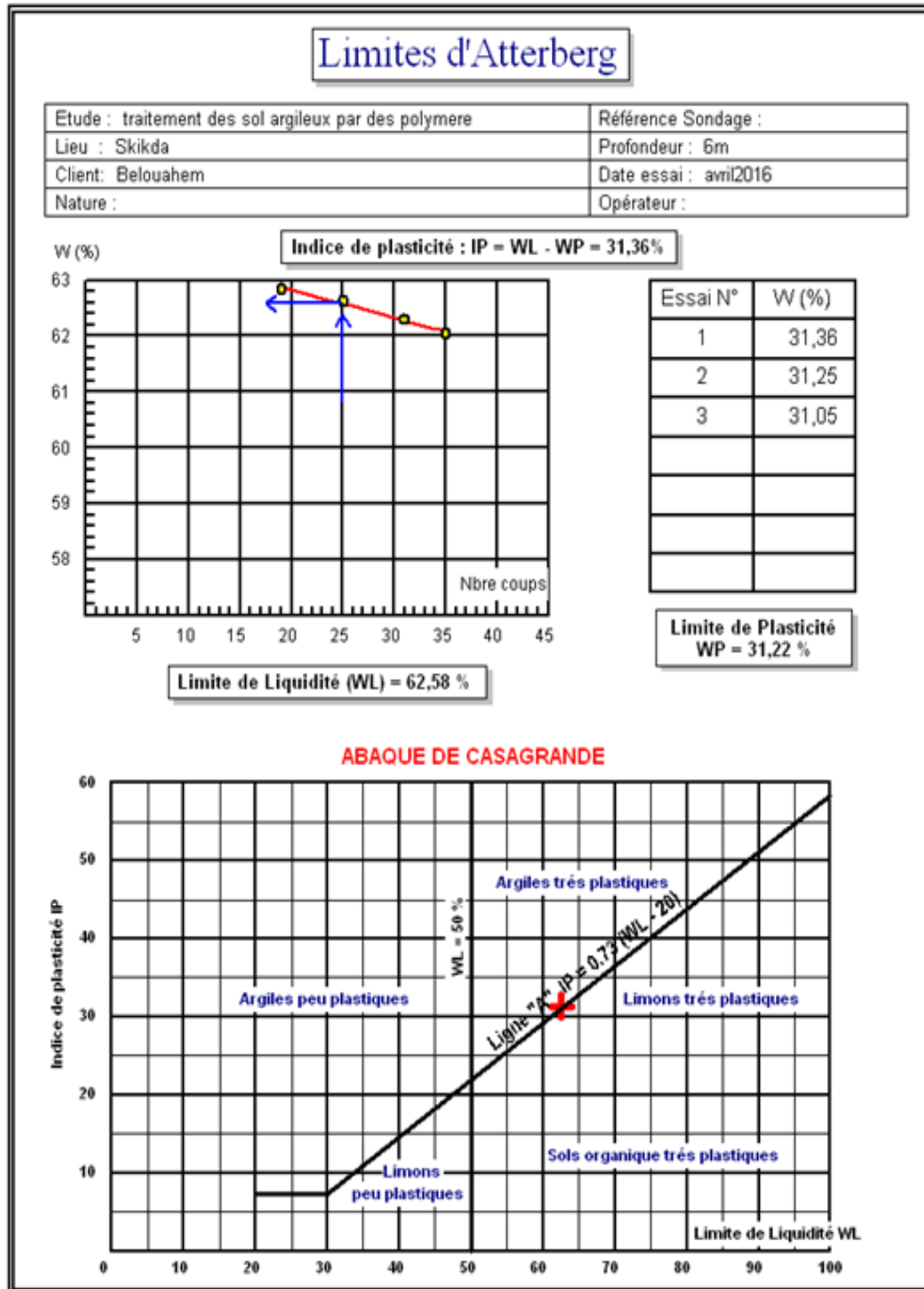


Figure 34 Résultat de l'essai de limites d'Atterberg

5.2.6 Caractéristiques intrinsèques

Les caractéristiques de résistance au cisaillement rectiligne de l'argile non consolidée, non drainée sont : $\Phi = 15.12^\circ$ et $C = 0.15$ bars.

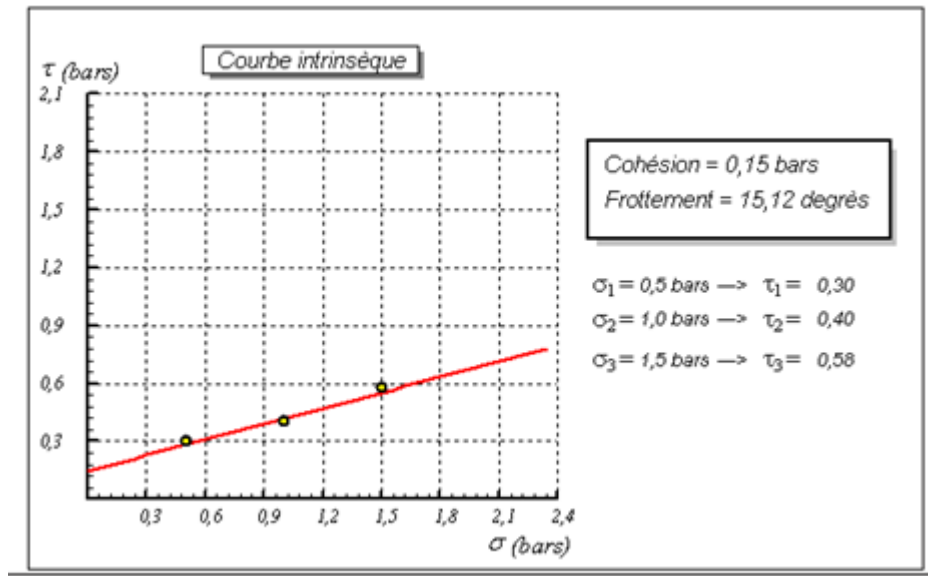


Figure 35 Courbe intrinsèque de l'argile de Ramadan Djamel

5.2.7 Caractéristiques Œdométriques

Tableau 12 Classification des sols en fonction de coefficient de compression

Coefficient de compression	Etat de sol
$C_c < 0.02$	Sol incompressible
$0.02 < C_c < 0.050$	Sol très peu compressible
$0.050 < C_c < 0.10$	Peu compressible
$0.100 < C_c < 0.200$	Sol moyennement compressible
$0.200 < C_c < 0.300$	Sol assez fortement compressible
$0.300 < C_c < 0.500$	Sol très compressible
$C_c > 0.500$	Sol extrêmement compressible

Les valeurs de l'indice de compressibilité sont comprises entre 12.32% et 23.32% caractérisant un sol moyennement et assez fortement compressible.

Tableau 13 Classification des sols en fonction de coefficient de gonflement selon (Magnan 2001)

Coefficient de gonflement	Etat de sol
$C_g < 5\%$	Non gonflant
$C_g > 5\%$	Gonflant

Les valeurs de coefficient de gonflement sont comprises entre 5.1 et 5.9 les valeurs sont supérieure à 5% caractérisant un sol gonflant.

Les valeurs de la pression de gonflement libre sont comprises entre 0.450 bars et 4.25 bars, caractérisant un sol de gonflement moyen à fort.

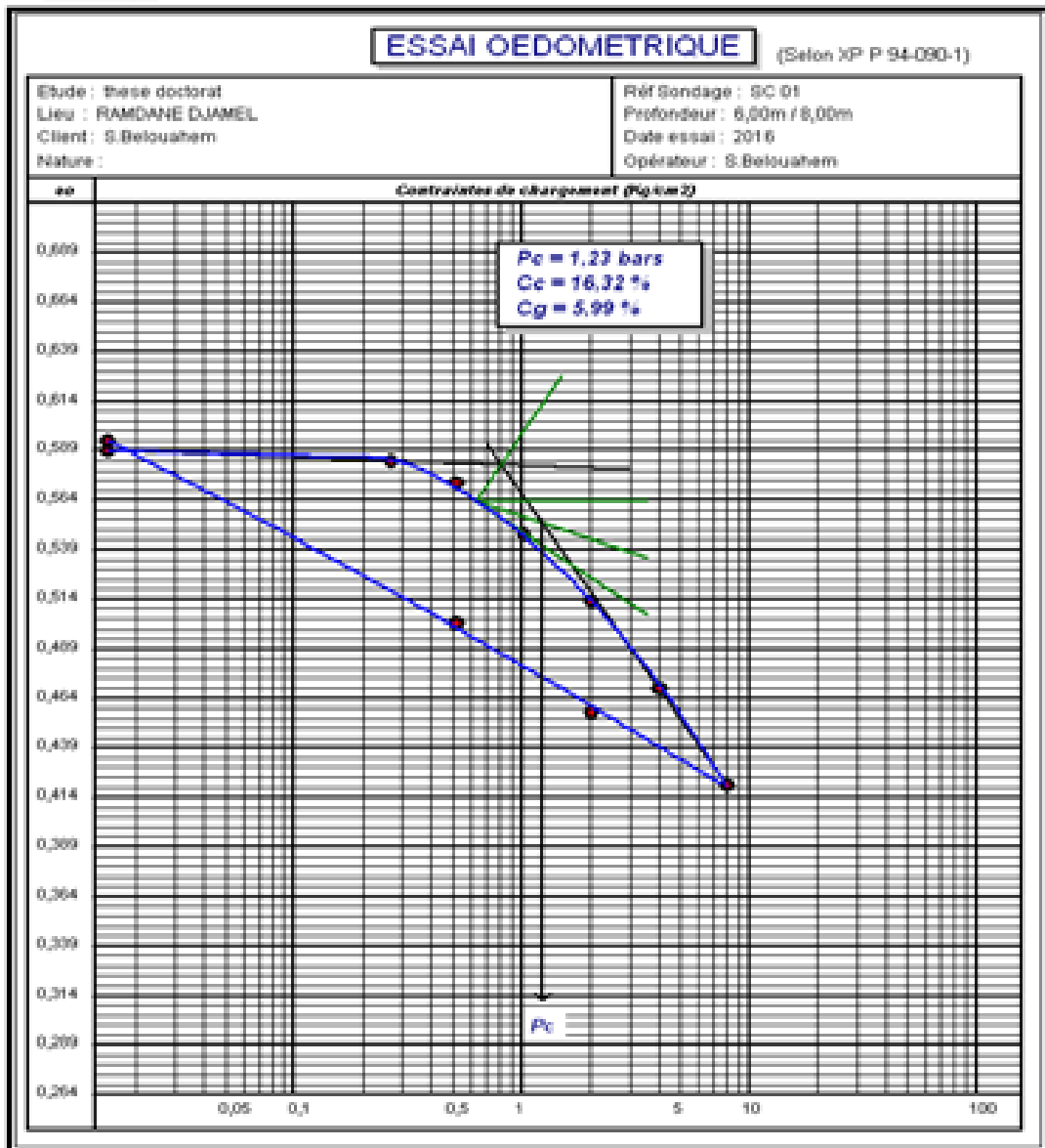


Figure 36 Courbe œdométrique

Tableau 14 Caractéristiques physico-mécaniques de l'argile de Ramadan Djamel

Propriétés	Valeurs	Observation
Teneur en eau naturelle W_n (%)	16.8	
Pourcentage des Particules fines ($\leq 0,08$ mm) (%)	70	
Bleu de méthylène VBS	6.12	Sol argileux
Limite de liquidité WL (%)	62.84	Argile très plastique
Limite de plasticité WP (%)	31.36	
Indice de plasticité IP (%)	31.48	
Teneur en eau optimale W_{opt} (%)	17.80	
Masse volumique sèche ρ_d (t/m^3)	1.75	Caractérisant un sol dense légèrement humide.
Cohésion C (bars)	0.15	
Angle de frottement ϕ (°)	15.12	
Pression de gonflement libre (kPa)	158	Caractérisant un sol de gonflement moyen à fort.
Indice de gonflement C_g (%)	5.8	Sol gonflant
Indice de compressibilité C_c (%)	15.99	Caractérisant un sol moyennement et assez fortement compressible.

5.3 Effet de l'ajout de bentonite sur les caractéristiques de l'argile de Ramadan Djamel

Le sol a été séché dans une étuve à 105°C pendant 24 h, puis mélangé manuellement avec respectivement 6 %, 12 %, 20 % et 25 % de bentonite pendant au moins 10 min pour créer une série de mélanges d'essai.

5.3.1 La valeur au bleu de Méthylène

Les résultats obtenus sont présentés sous forme d'un histogramme dans la figure 37, nous observons que la valeur de VB augmente avec l'augmentation du pourcentage de la bentonite, ce qui montre l'influence de l'ajout de la bentonite sur le VB. La valeur de bleu pour le sol naturel $VB = 6.12$ augmente légèrement pour 6% de bentonite à la valeur de $VB = 7.7$, au voisinage de 12%, le VB atteint la valeur de 8.9. Pour 20% de bentonite, la valeur de $VB=13$, et à 25% le $VB=12.8$. Ces résultats confirment l'effet actif de la bentonite si elle est mélangée avec un sol naturel qui devient très plastique et de gonflement élevé, ces résultats sont confirmés par *S. Adjabi et al, (2017)*, *S. R. Bekkouche et al, (2022)*.

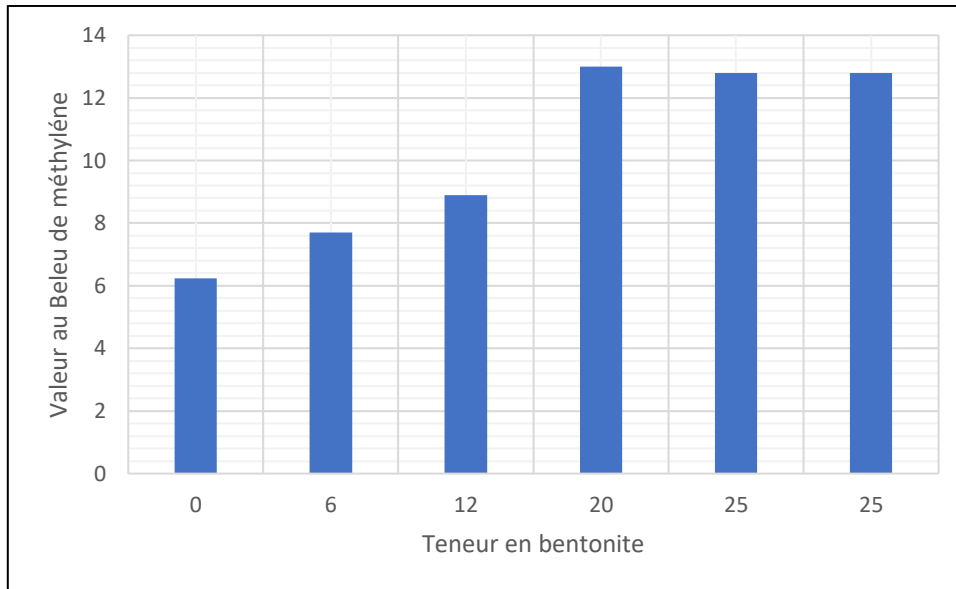


Figure 37 Effet de l'ajout de la Bentonite sur les Valeurs au bleu de méthylène

5.3.2 La teneur en eau et la masse volumique sèche

Dans l'étude de l'effet de l'ajout de la Bentonite sur les propriétés physiques identifiées par l'essai Proctor, nous remarquons dans les figures 38 et 39 et 40 que la teneur en eau optimale et la masse volumique sèche augmentent avec l'augmentation de la quantité de la Bentonite qui est justifiée par l'augmentation de la fraction d'argile et l'eau absorbe une importante partie de l'énergie de compactage, il prend la place de grains solide, (de 17.8% pour l'argile naturelle à 19% pour l'argile constituée à 6% de Bentonite, et 20% pour l'argile reconstituée à 12%, et augmente à 20% pour l'argile reconstituée à 12 % et 20% de Bentonite).

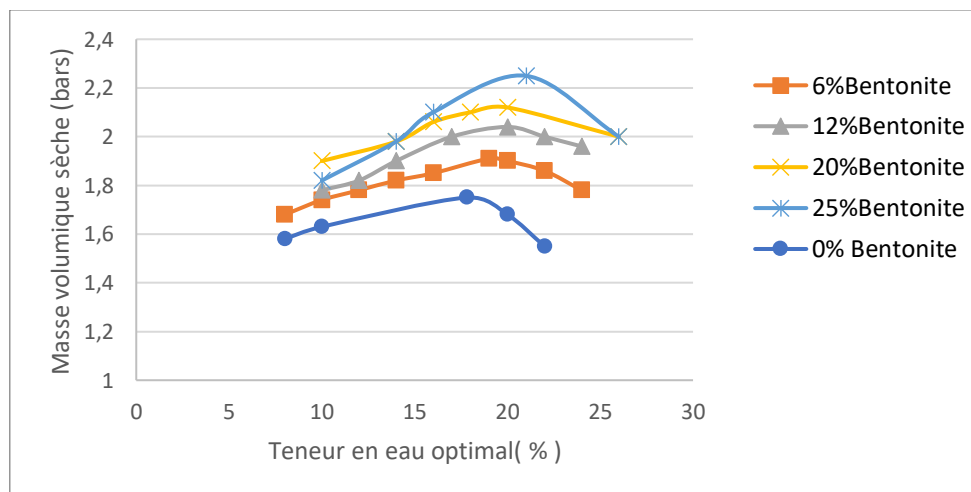


Figure 38 Effet de la Bentonite sur la teneur en eau et la masse volumique sèche

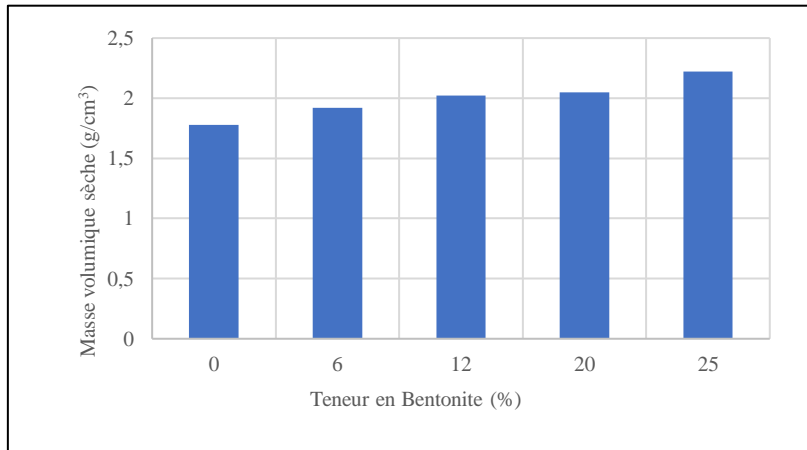


Figure 39 Effet de la Bentonite sur la masse volumique sèche

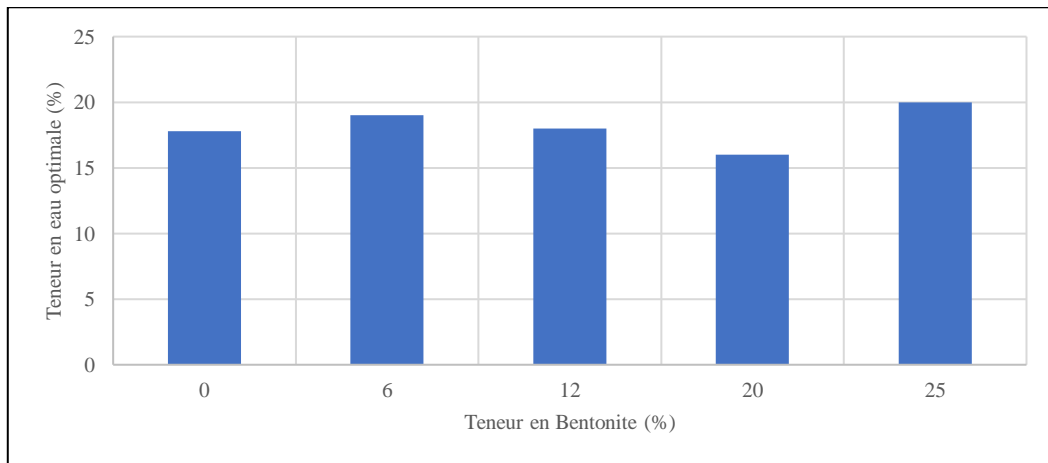


Figure 40 Effet de la Bentonite sur la teneur en eau optimale

5.3.3 Les limites d'Atterberg

Les résultats des limites d'Atterberg sont présentés dans la figure 41.

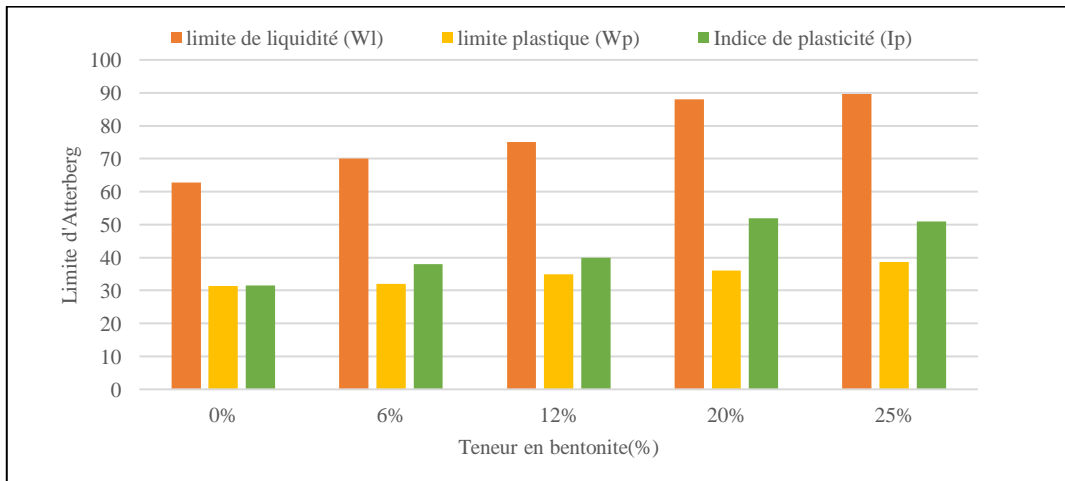


Figure 41 Variation des limites d'Atterberg en fonction de la teneur en bentonite

Nous pouvons voir que la bentonite a un effet considérable sur les limites d'Atterberg. Les limites d'Atterberg augmentent avec l'augmentation de la teneur en bentonite. L'ajout de 25 % de bentonite a augmenté l'indice de plasticité de 31.48 % à 50.99 %, cela est justifié par l'augmentation de la quantité des particules fines peu perméables et la quantité d'eau absorbée qui entre dans leur composition et modifie la structure de l'argile, car elle peut pénétrer à l'intérieur de leur réseau cristallin.

L'augmentation des limites d'Atterberg observée dans cette étude en fonction de l'ajout de différents niveaux de bentonite est due à l'augmentation de la surface spécifique due à l'ajout de particules plus fines par rapport au sol étudié.

5.3.4 Les Caractéristiques intrinsèques

5.3.5 Effet de la bentonite sur la cohésion

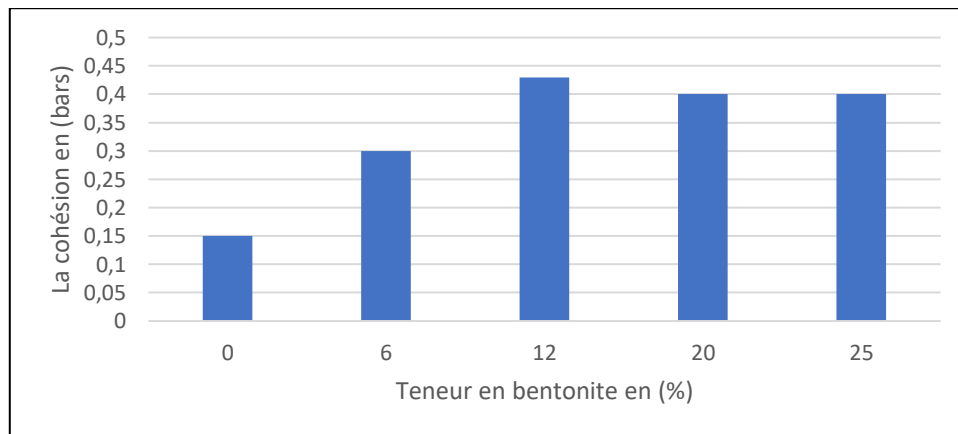


Figure 42 Effet de l'ajout de la bentonite sur la cohésion des sols reconstitués

Les résultats obtenus sont présentés sous forme d'un histogramme de la figure 42. Il est à noter qu'il y a une augmentation de la cohésion avec l'augmentation de la teneur en bentonite pour les pourcentages 6%, 12% et 20%, elle atteindra une valeur de 0.43 bars.

5.3.6 Effet de la bentonite sur l'angle de frottement

Les résultats de l'angle de frottement sont présentés par l'histogramme de la figure 43, au début on observe une augmentation de l'angle de frottement interne à 6% de bentonite, ensuite ces valeurs continuent à augmenter jusqu'à la stabilisation à 16.08° pour un ajout de 20% et 25% de bentonite. L'augmentation des dosages de la bentonite peut provoquer une cimentation des grains.

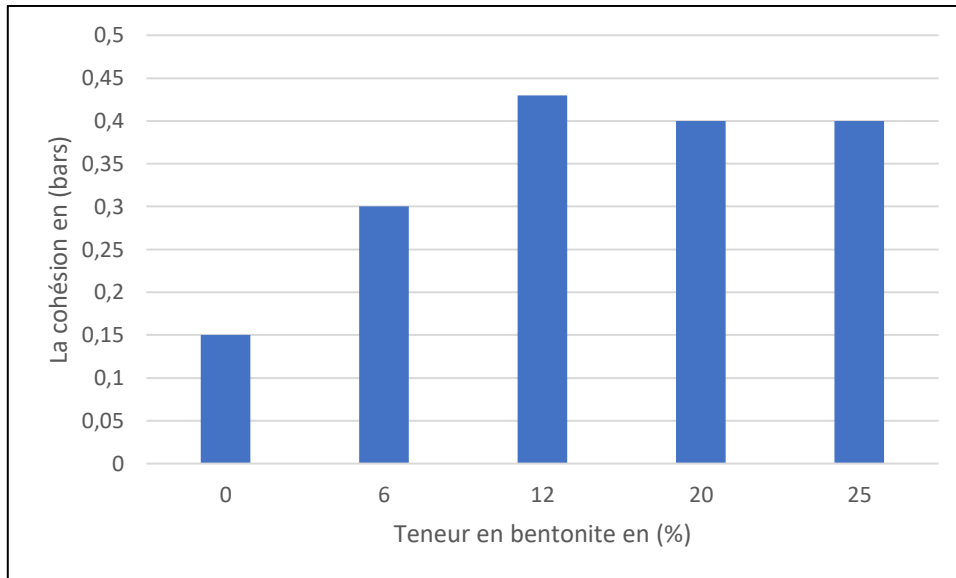


Figure 43 Effet de l'ajout de la bentonite sur l'angle de frottement des sols reconstitués

5.3.7 Les paramètres de gonflement

5.3.7.1 Effet de l'ajout de bentonite sur l'indice de compressibilité

La figure 44, montre les résultats de l'effet de la bentonite sur la variation de la compressibilité des sols naturels et reconstitués.

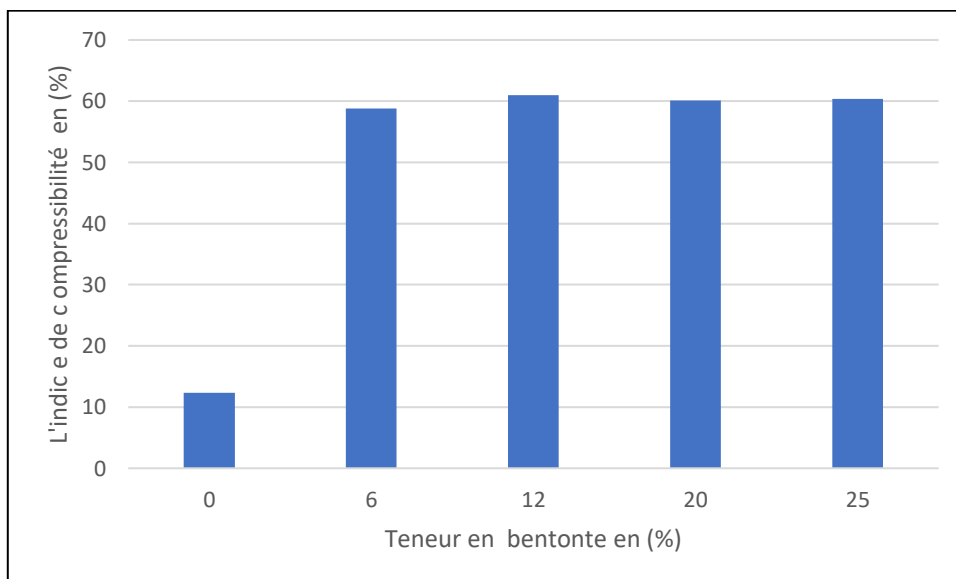


Figure 44 Effet de la Bentonite sur l'indice de compressibilité

On constate que l'indice de compressibilité augmente pour le pourcentage 6% de bentonite jusqu'à la valeur 58,8%. À 12%, , les valeurs d'indice de compressibilité augmentent à 60,94% pour 12%, et 60,08 , 60,33% pour l'ajout de 20% et 25% de bentonite cette augmentation est due à la composition minéralogique des mélanges .

5.3.7.2 Effet de l'ajout de bentonite sur l'indice de gonflement

La figure 45, montre les résultats de l'effet de la bentonite sur la variation de l'indice de gonflement des sols naturels et reconstitués.

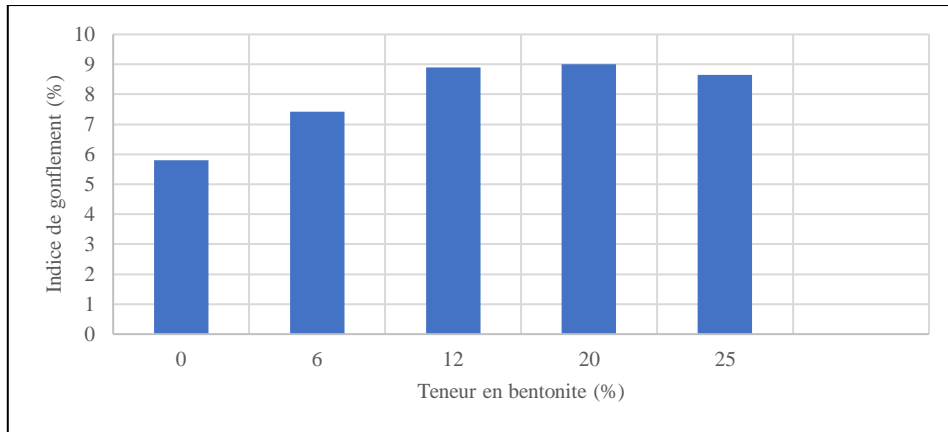


Figure 45 Effet de la Bentonite sur l'indice de gonflement

L'augmentation de l'indice de gonflement avec l'augmentation de la teneur de bentonite est tout à fait remarquable dans la Figure 45. L'indice de gonflement passe de 5.8% à 7,42% avec un ajout de 6% de bentonite et continu à augmenter pour atteindre une valeur de 9.01% pour 20% de bentonite, ensuite diminue légèrement à une valeur de 8.65% pour l'ajout de 25% de bentonite.

5.3.7.3 Effet de l'ajout de bentonite sur la pression de gonflement

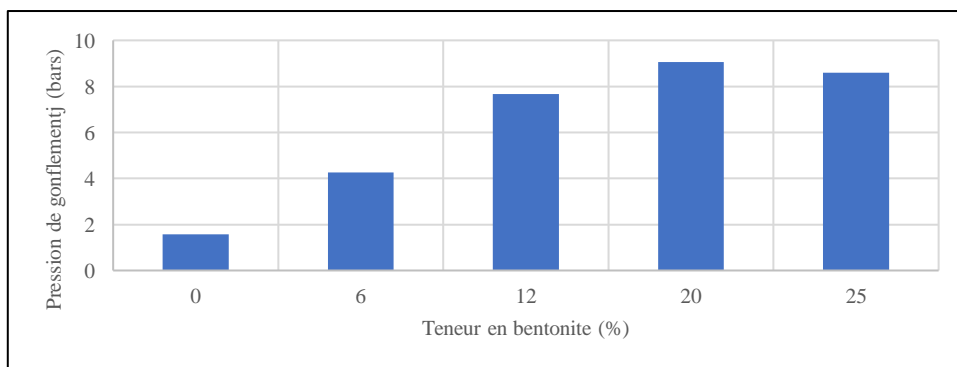


Figure 46 Effet de la bentonite sur la pression de gonflement

L'effet de l'ajout de la bentonite sur la pression de gonflement est figuré dans l'histogramme de la figure 46, la pression de gonflement augmente avec l'augmentation de la teneur en bentonite due au remplissage des pores par les grains fins de la bentonite.

D'après les figures 44, 45 et 46, on remarque une augmentation des paramètres de gonflement qui comprend respectivement ; l'indice de compressibilité ; l'indice de gonflement et la pression de gonflement, en fonction de l'augmentation du taux de la bentonite (6% ,12%, 20% et 25%),

les sols reconstitués devient gonflants $C_g > 5\%$ et moyennement compressible à extrêmement compressible $C_c > 0.5$. À cause de la présence des particules argileuses fines.

Tableau 15 Effet de la Bentonite sur les paramètres de gonflement

Pourcentage de Bentonite	0%	3%	6%	12%	20%	25%
C_g	5.8	6	7.42	8.9	9.01	8.65
C_c	15.99	33.02	58.8	60.94	60.08	60.33
P_c	1.58	3.87	4.05	7.66	9.05	8.59

Tableau 16 Potentiel de gonflement en fonction des critères géotechniques

Sols	Valeur de bleu de méthylène		Indice de plasticité		Coefficient de gonflement		Potentiel du gonflement
0% Bentonite	6.12	< 2.5	31.48	<12	5.8	0.025	Faible
		2.5 à 6		12 à 25		0.025 à 0.05	Moyen
		6 à 8		25 à 40		0.05 à 0.09	Fort
		≥ à 8		≥40		≥0,09	Très fort
6% Bentonite	7.7	< 2.5	38	<12	7.42	0.025	Faible
		2.5 à 6		12 à 25		0.025 à 0.05	Moyen
		6 à 8		25 à 40		0.05 à 0.09	Fort
		≥ à 8		≥40		≥0,09	Très fort
12% Bentonite	8.9	< 2.5	40	<12	8.9	0.025	Faible
		2.5 à 6		12 à 25		0.025 à 0.05	Moyen
		6 à 8		25 à 40		0.05 à 0.09	Fort
		≥ à 8		≥40		≥0,09	Très fort
20% Bentonite	13	< 2.5	52	<12	9.01	0.025	Faible
		2.5 à 6		12 à 25		0.025 à 0.05	Moyen
		6 à 8		25 à 40		0.05 à 0.09	Fort
		≥ à 8		≥40		≥0,09	Très fort
25% Bentonite	12.8	< 2.5	50.99	<12	8.65	0.025	Faible
		2.5 à 6		12 à 25		0.025 à 0.05	Moyen
		6 à 8		25 à 40		0.05 à 0.09	Fort
		≥ à 8		≥40		≥0,09	Très fort

D'après les tableaux 15 et 16, on peut conclure que le caractère gonflant des sols examinés apparaît clairement à travers l'ensemble des classifications citées, les classifications basées sur la fraction argileuse, sur la valeur de bleu de méthylène ainsi que les limites d'Atterberg, les sols testés sont très plastiques. Le taux et la pression de gonflement des sols reconstitués par la Bentonite de Moghnia sont très élevés par rapport à ceux de l'argile de Ramadan Djamel ; ce qui est en accord avec les travaux cités dans la littérature. Les sols étudiés sont moyennement à fortement gonflant.

5.4 Traitement des sols par les polymères

Une série des essais a été réalisée sur les différentes éprouvettes mélangées à plusieurs niveaux de bentonite, puis mélangées à plusieurs types de polymères (Polychlorure de vinyle - Polyéthylène haute densité - Polyéthylène basse densité - Polyéthylène téréphtalate et Polypropylène) à plusieurs pourcentages (0%, 3 %, 6%, 12% et 20%).

5.4.1 Effet de PVC (Polychlorure de Vinyle)

5.4.1.1 Effet de PVC (Polychlorure de Vinyle) sur la valeur du Bleu de Méthylène

Les résultats des valeurs de bleu de méthylène des différents mélanges de sol naturel et les sols reconstitués par l'ajout de la bentonite en fonction des variations de pourcentage du PVC ajoutés sont représentés sur la figure 47.

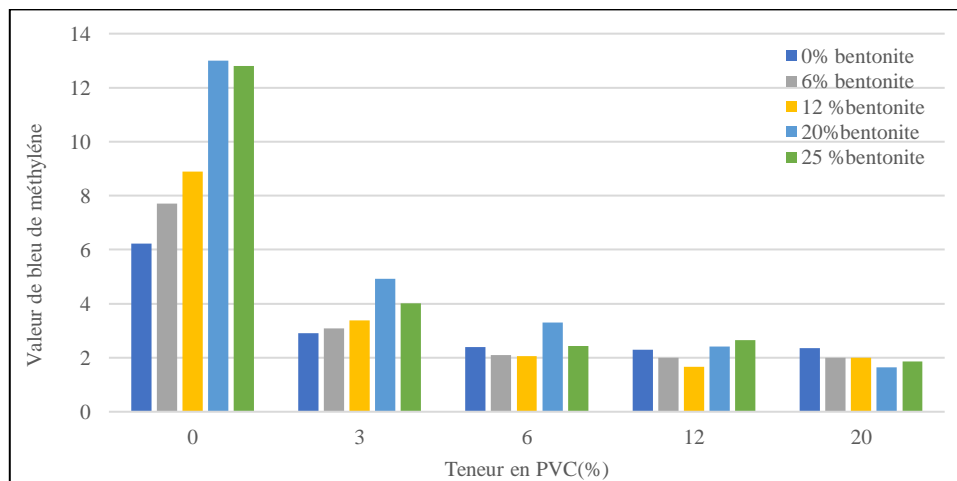


Figure 47 Effet du PVC sur les valeurs de bleu de méthylène

D'après les résultats de traitement des différents mélanges par le PVC, on observe que les valeurs de bleu de méthylène VB diminuent avec l'augmentation de dosage de PVC. Cette décroissance de VB en fonction de dosage augmenté de PVC montre l'effet positive de l'ajout de PVC.

Pour un sol reconstitué par 20% de bentonite, les valeurs de VB diminuent de 13 à 4.92, pour une teneur de 3% de PVC et chute à 1.65 pour un dosage de 20% de PVC.

Ces diminutions peuvent être dues à l'augmentation de la porosité avec l'ajout de PVC, ce qui conduit à un changement considérable dans la structure et la texture.

5.4.1.2 Effet de PVC (Polychlorure de Vinyle) sur les caractéristiques de compactage

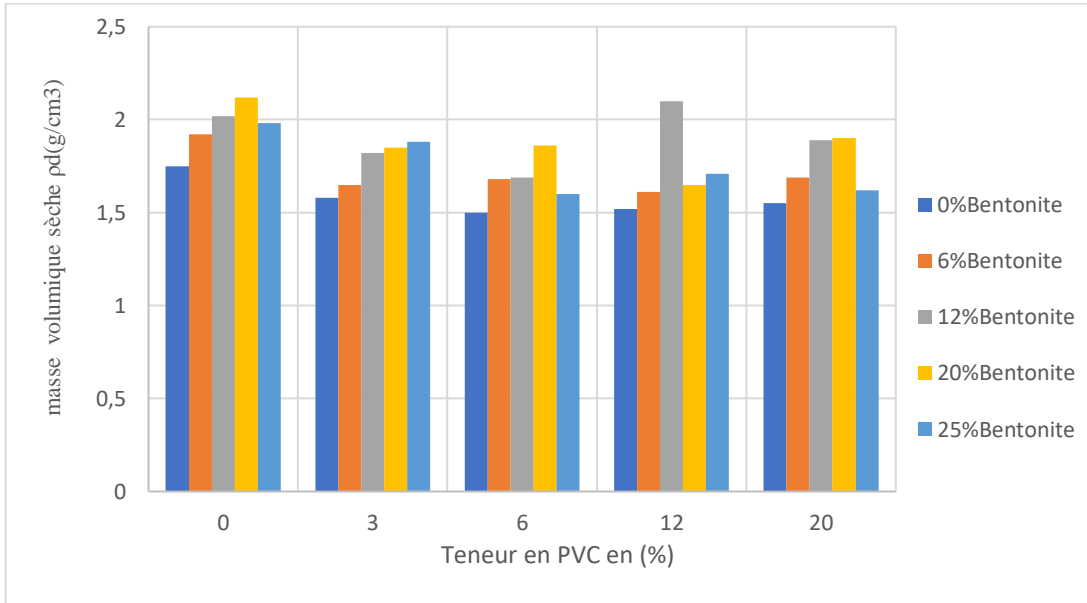


Figure 48 Effet de l'ajout de PVC sur la masse volumique sèche pour les mélanges étudiés

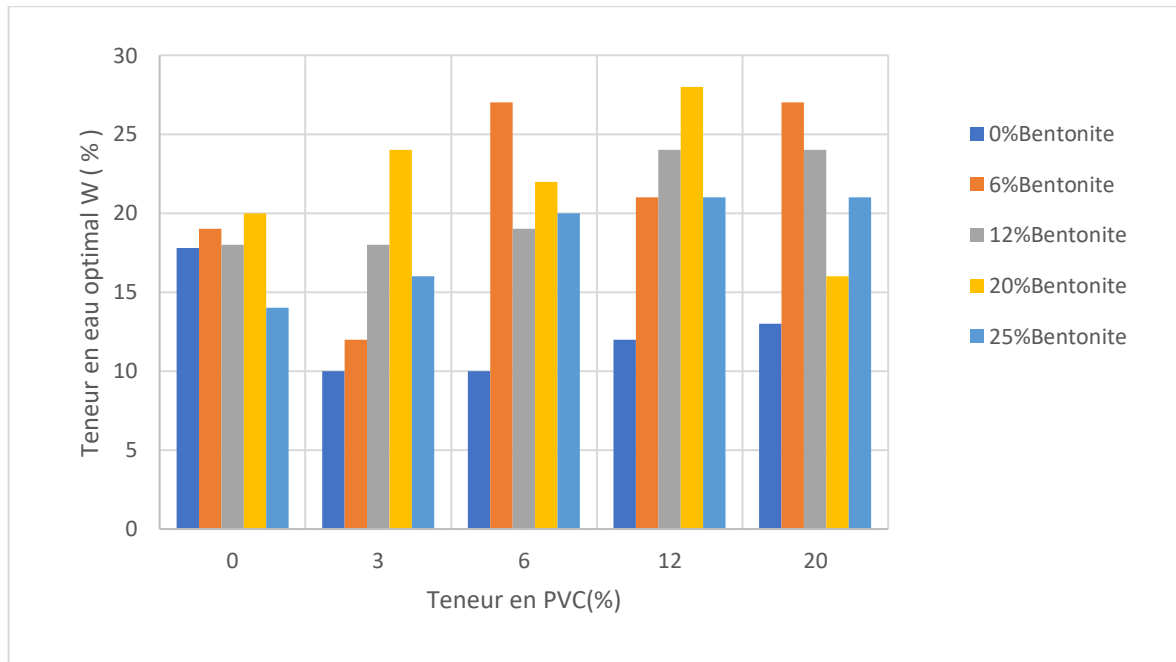


Figure 49 Effet de l'ajout de PVC sur la teneur en eau optimale pour les mélanges étudiés.

Les figures 48 et 49 présentent les résultats de l'essai de compactage des différents mélanges en fonction des différents pourcentages de PVC.

On remarque que dans la figure 48 la masse volumique sèche diminue en fonction des dosages augmentés de PVC et dans la figure 49 la teneur en eau optimale augmente en fonction de l'augmentation des dosages de PVC. Ce changement est considéré comme une indication de l'amélioration des caractéristiques de compactage du sol stabilisé à cause de la réaction de PVC avec les particules fines de l'argile et argile la bentonite qui provoque l'échange d'ions entre le PVC et les minéraux du sol fin causant la défloculation des minéraux des particules fines du sol.

5.4.1.3 Effet de PVC (Polychlorure de Vinyle) sur les Limites Atterberg

Les résultats des tests sont présentés dans la figure 50. On observe que l'indice de plasticité diminue de la valeur de 50.99 % à la valeur de 36.05 %, soit une baisse d'environ 30 % de la plasticité, la diminution observée de l'indice de plasticité lorsque le polychlorure de vinyle est introduit pour la première fois dans le sol pourrait être attribué à l'effet de l'emboîtement et du frottement qui en résultent entre les Polychlorures de vinyle et les particules de sol.

Ces résultats ont été confirmés dans la littérature spécialisé *Baba Hassane Ahmed Hisseini. (2004)*, *Inyang H l et al, (2007)*, *L Hammadi et al, (2014)*, *Mpofu P let al, (2004)*, qui ont étudié l'effet des ajouts sur le comportement des argiles gonflantes.

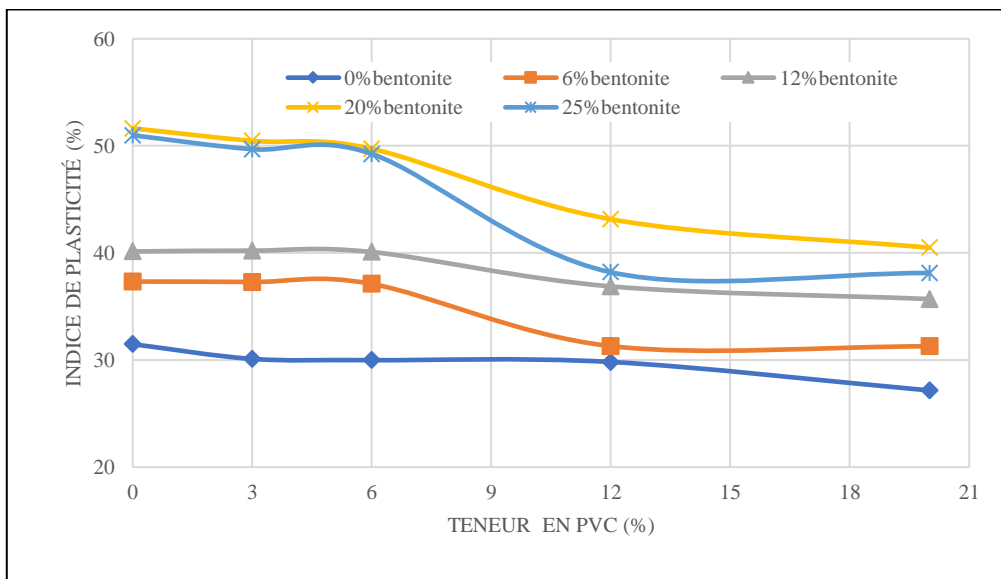


Figure 50 Variation de l'indice de plasticité en fonction de taux de polychlorure de vinyle PVC

5.4.1.4 Effet de PVC (Polychlorure de Vinyle) sur les paramètres de cisaillement

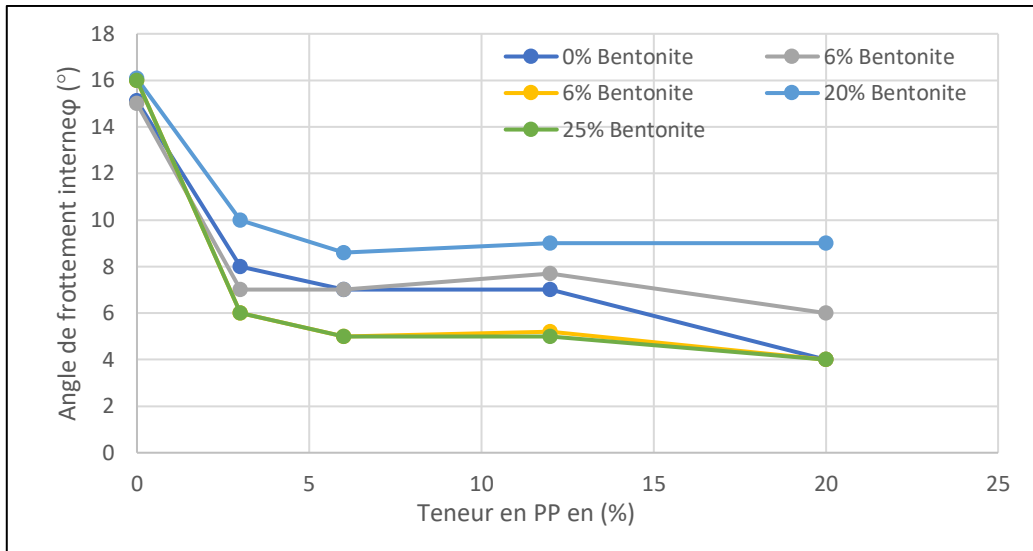


Figure 51 Effet de PVC sur l'angle de frottement interne

Les résultats dans la figure 51 montrent que l'angle de frottement interne augmente à un dosage en PVC de 6% pour le sol sans bentonite, la même constatation pour le sol reconstitué par 6% de bentonite mélangé à 3% de PVC. Cette augmentation est probablement due au remplissage des pores par le PVC, pour les éprouvettes mélangées à 12%, 20% et 25% de bentonite, l'angle de frottement se stabilise à partir du dosage de 12% de PVC à cause de la floculation des particules argileuse qui se produit de la combinaison de la bentonite et de PVC formant des agrégats plus fins. *P. Priyadharshini et al, (2018), Mpofo P et al, (2004), Boukhedimi Mohamed Amine, (2008), Mazahir M. M. Taha et al, (2020).*

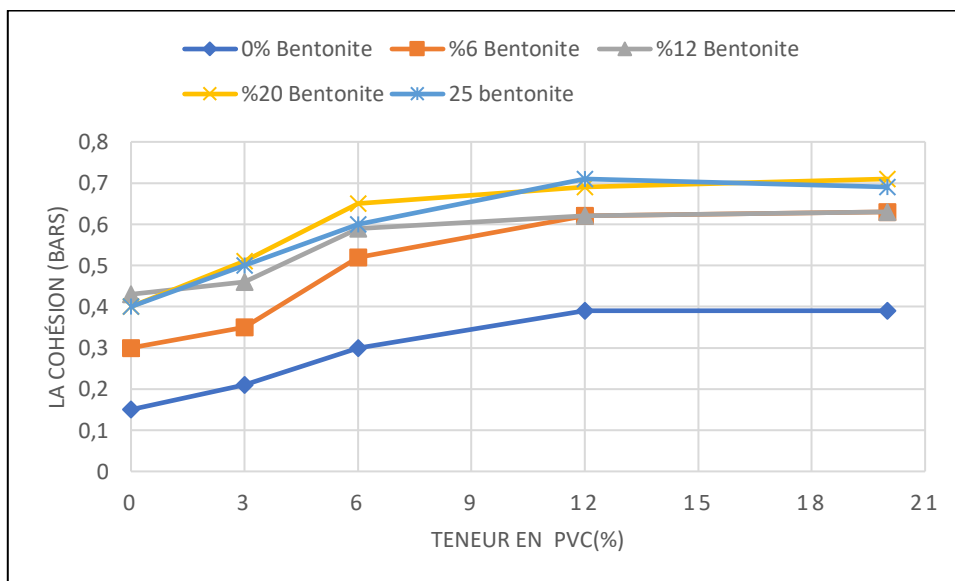


Figure 52 Effet de PVC sur la Cohésion pour les différents mélanges

On remarque dans la figure 52, que l'ajout de PVC aux différentes éprouvettes a une influence remarquable sur la cohésion des mélanges préparés.

La cohésion des sols traités par le PVC est améliorée par rapport au sol non traité, ce qui suggère un changement de comportement mécanique.

5.4.1.5 Effet de PVC (Polychlorure de Vinyle) sur les caractéristiques Œdométriques

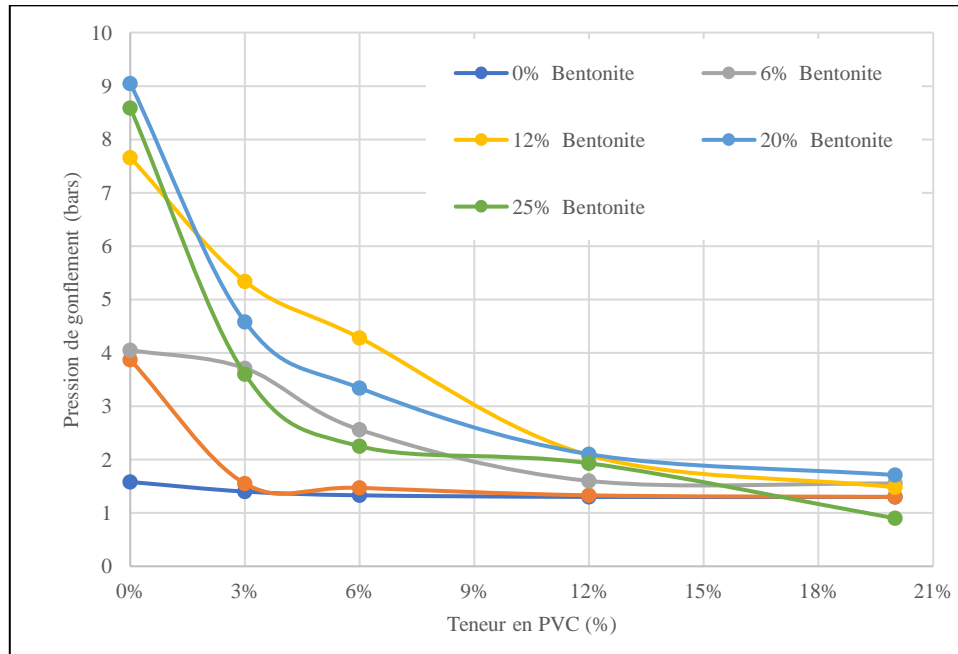


Figure 53 Effet de PVC sur la pression de gonflement

Les résultats de l'effet de PVC sur les caractéristiques œdométriques du sol sont présentés dans les Figures 53, 54 et 55. On constate que la pression de gonflement diminue avec l'augmentation du pourcentage de Polychlorure de Vinyle et cela pour tous les sols reconstitués par la bentonite.

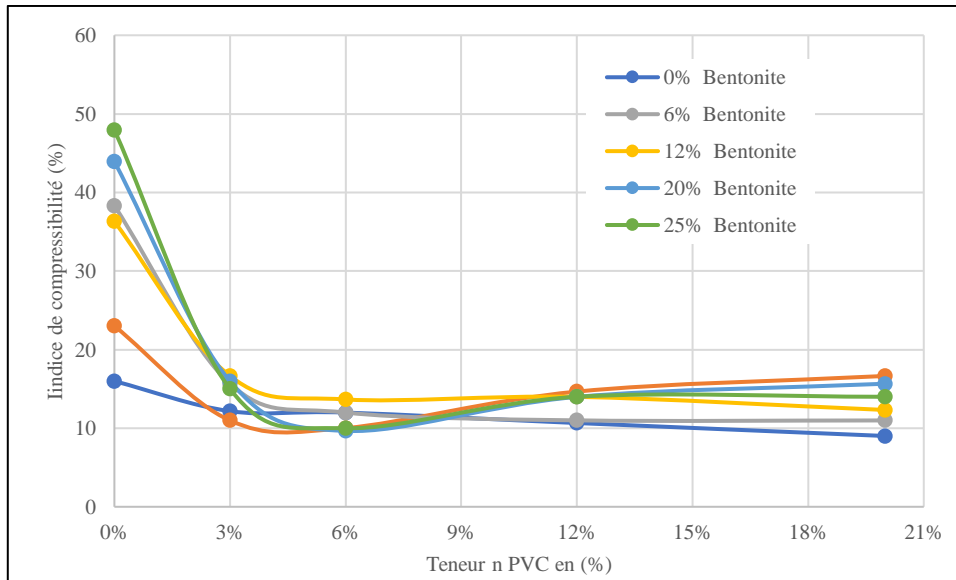


Figure 54 Effet de PVC sur l'indice de compressibilité

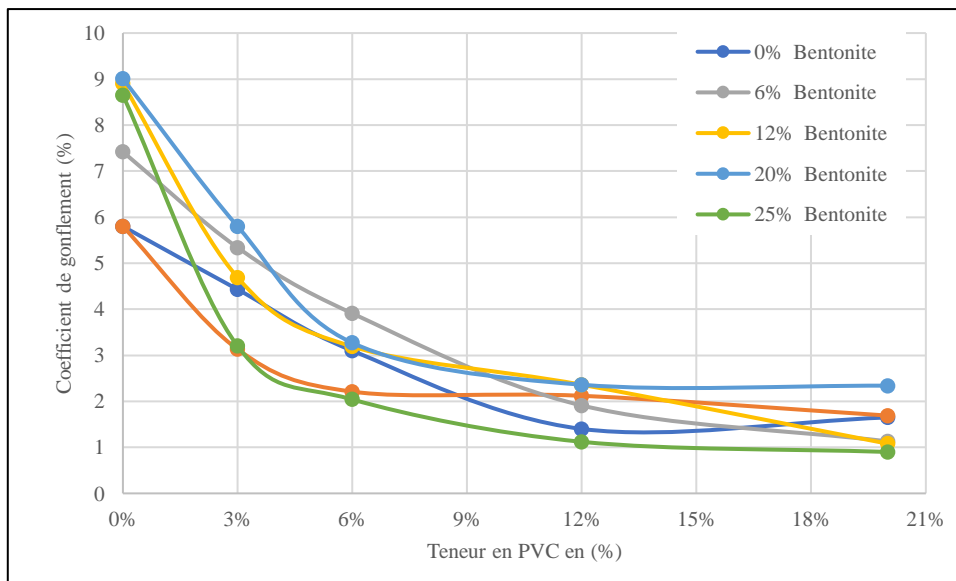


Figure 55 Effet de PVC sur le coefficient de gonflement

A partir des résultats des essais œdométriques, on remarque qu'il y a une amélioration dans les caractéristiques de gonflement du sol traité, une diminution remarquable dans l'indice de gonflement et l'indice de compressibilité respectivement avec l'augmentation des pourcentages de PVC, l'indice de gonflement du sol non traité est 5.8% (sol gonflable), il diminue jusqu'à 1.65% pour une teneur de 20% tandis que l'indice de compressibilité du sol non traité est 15.99% et diminue jusqu'à 9.01% pour une teneur en PVC de 20% . Cette diminution est dû à l'effet favorable du PVC pour stabiliser le gonflement, donc le sol amélioré par le PVC change de structure et de texture Rehab Bekkouche S And Boukhatem G. (2016), Souhila Adjabi et al, (2017), L GHammadi et al, (2014), Mpofu P et al, (2004) .

5.5 Traitement par le Polypropylène PP

5.5.1 Effet de PP sur les Valeurs au Bleu de Méthylène

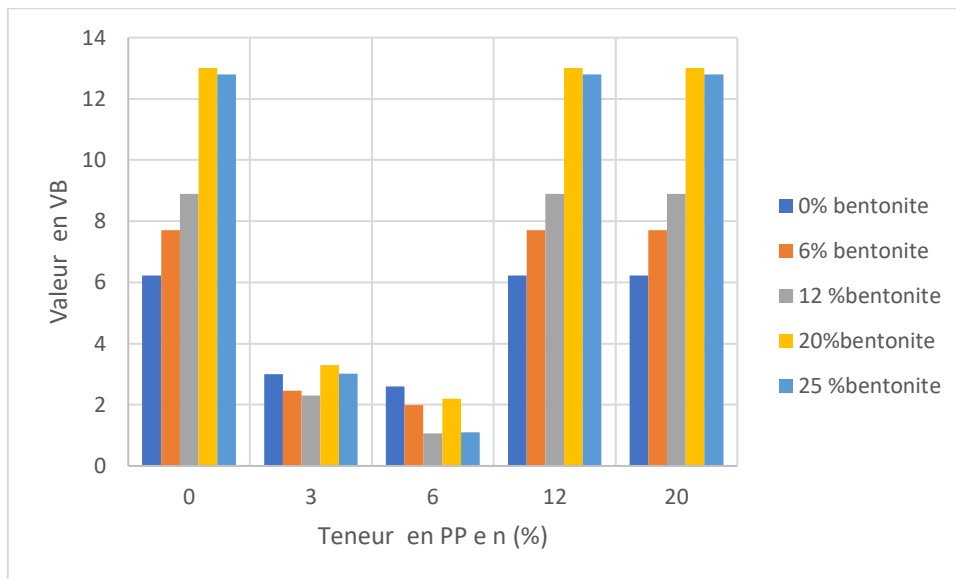


Figure 56 Effet de PP sur les valeurs de bleu de méthylène

D'après la figure 56, on remarque que l'ajout de pourcentage de 3 à 6 % de PP diminue la valeur de bleu méthylène du sol naturel et aussi des sols reconstitués par différents pourcentages de bentonite, donc l'addition de PP dans ce cas réduit le potentiel de gonflement, et pour les pourcentages de 12% et 20% la valeur de bleu méthylène reste constant est égale à la valeur de bleu méthylène initiale de chaque pourcentage de Bentonite. Ce qui montre que la nature minéralogique et la texture de l'argile et de l'ajout joue également un rôle essentiel sur le phénomène du gonflement.

5.5.2 Effet de PP sur les paramètres compactage

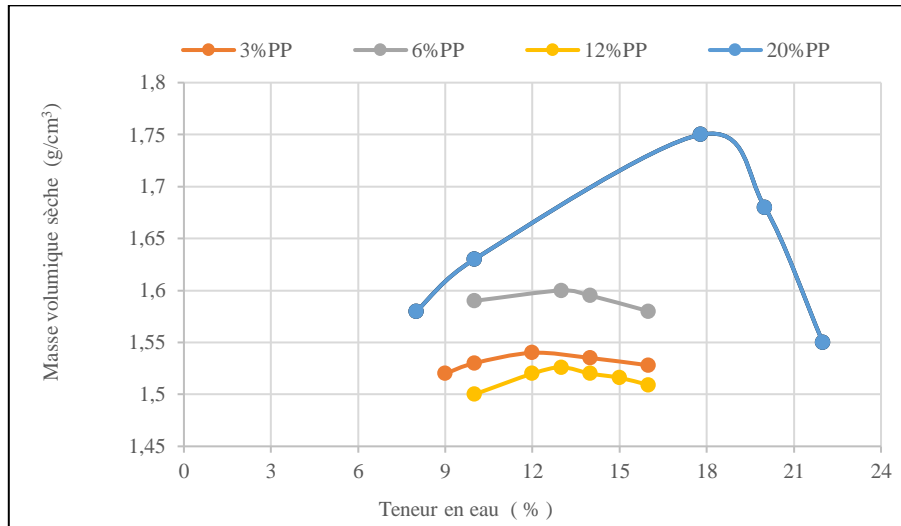


Figure 57 Courbes Proctor en fonction des différents taux de PP pour l'argile de Ramdan Djamel

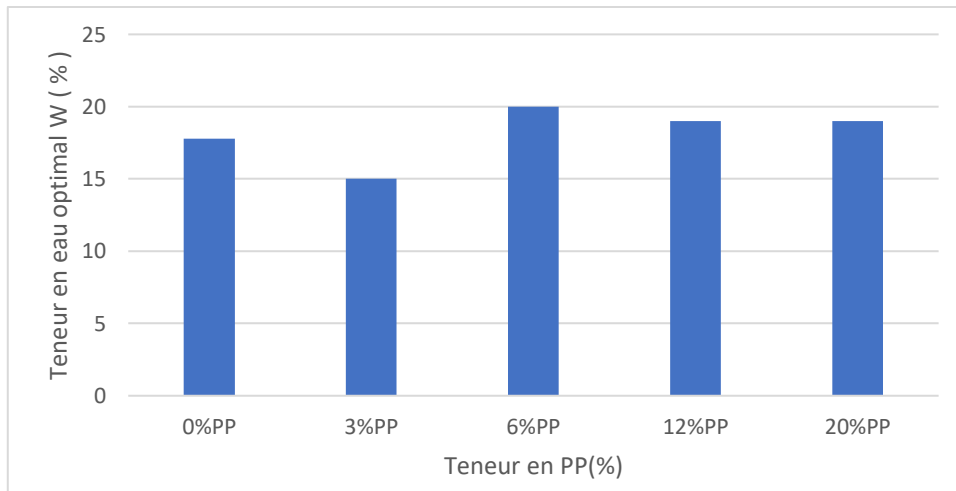


Figure 58 Effet de PP sur la teneur en eau pour l'argile de Ramdane Djamel

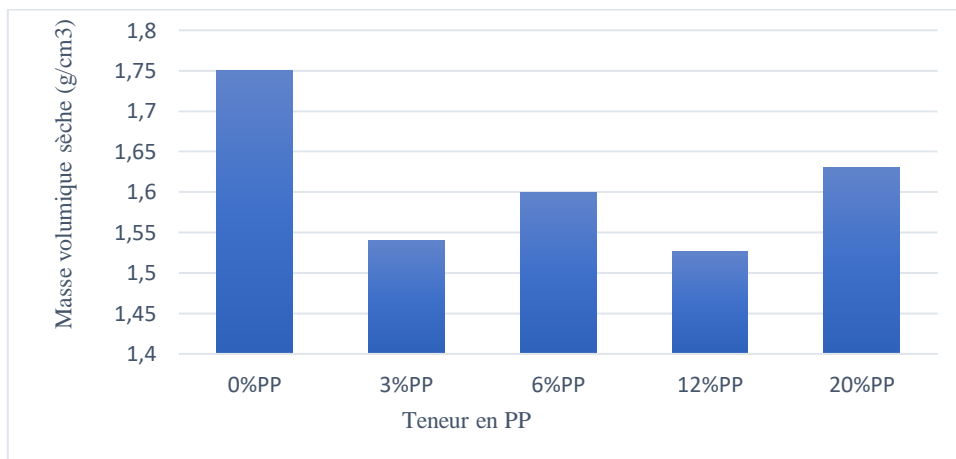


Figure 59 Effet de PP sur la masse volumique sèche pour l'argile de Ramdan Djamel

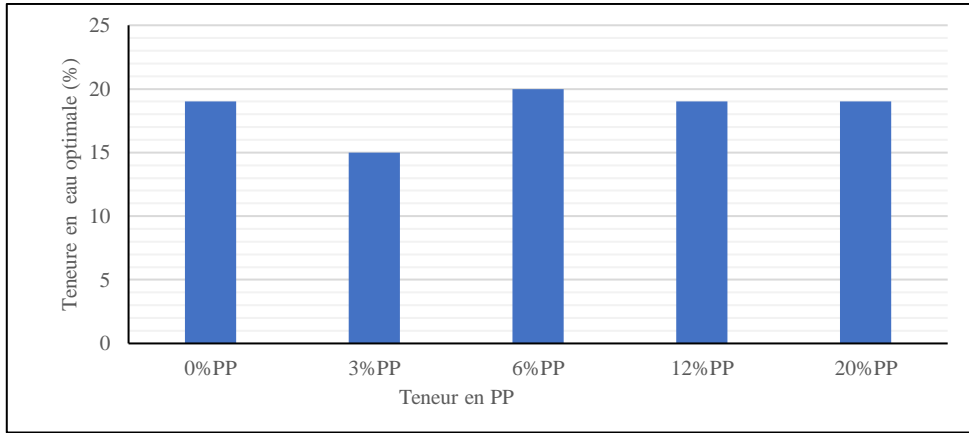


Figure 60 Effet de PP sur la teneur en eau pour le sol reconstitué par 6% de bentonite

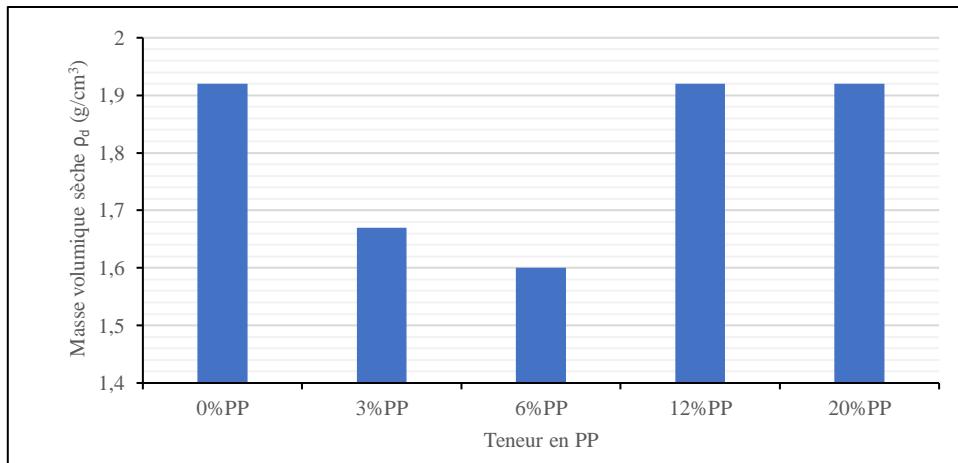


Figure 61 Effet de PP sur la masse volumique sèche pour le sol reconstitué par 6% de bentonite

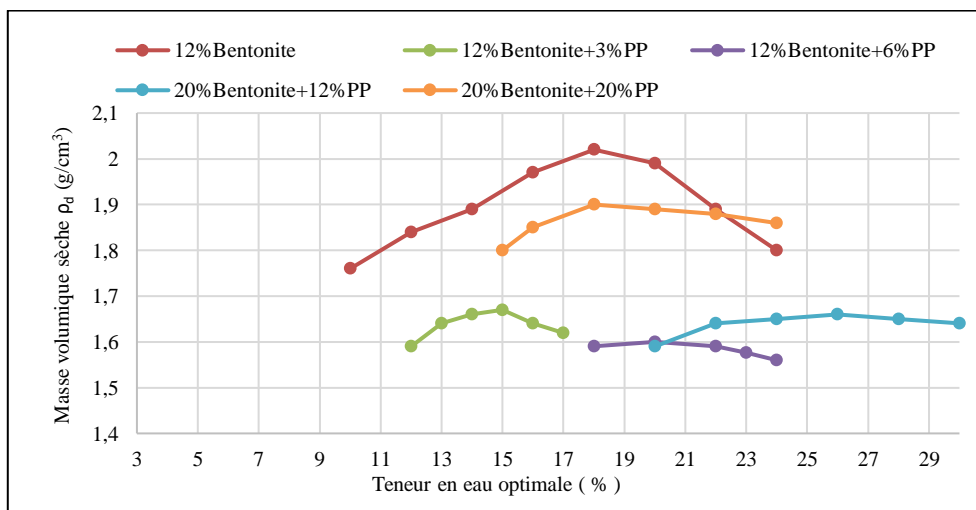


Figure 62 Effet de PP sur la densité sèche et la teneur en eau pour le sol reconstitué par 12% de bentonite

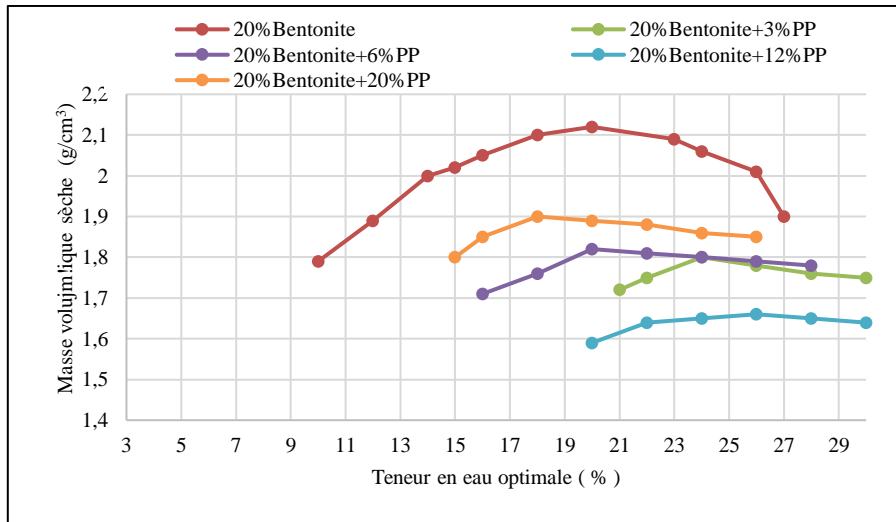


Figure 63 Effet de PP sur la densité sèche et la teneur en eau autour le sol reconstitué par 20% de bentonite

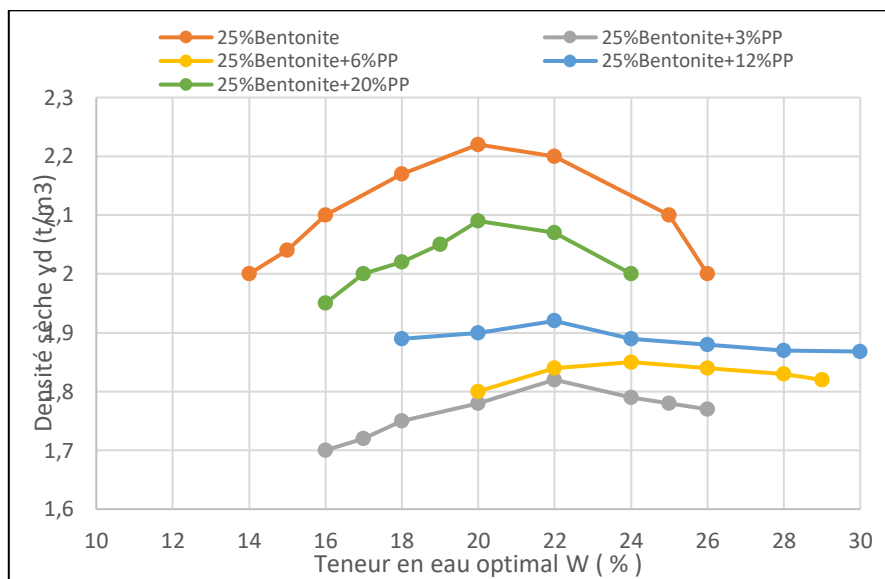


Figure 64 Effet de PP sur la densité sèche et la teneur en eau pour le sol reconstitué par 25% de bentonite

Les résultats des essais de compactage sont présentés dans les figures 57 à 64. L'ajout de PP au sol diminue les valeurs de la masse volumique sèche. Les essais montrent que pour le sol naturel de Ramadan Djamel et les sols reconstitués avec différents dosages de bentonite et mélangés avec différents pourcentages de PP (3%, 6%, 12%, et 20%), la masse volumique sèche diminue, et la teneur en eau optimale augmente, les courbes sont aplaties et que le compactage est peu influencé par l'ajout.

A 20% de PP, pour le sol reconstitué par 3% et 6% de bentonite les résultats sont similaires à celle de l'état initial car les échantillons deviennent très secs à cause de la forte absorption d'eau des fibres de Polypropylène

5.5.3 Effet de PP sur les Limites d'Atterberg :

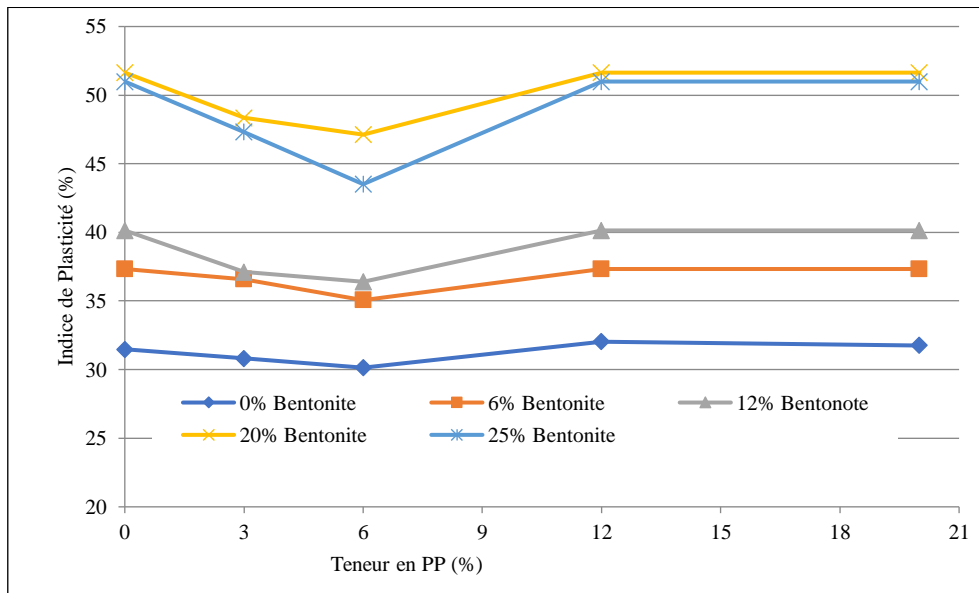


Figure 65 Effet de PP sur les Limites d'Atterberg pour les mélanges de sols.

Les résultats des limites d'Atterberg montrent que l'ajout de PP avec des pourcentages varie de (0%-6%), influe sur les paramètres de plasticités des sols et réduit l'indice de plasticité ainsi que la limite de liquidité qui permet la réduction de taux de gonflement, et l'ajout des pourcentages plus de 6% rend le sol sec.

L'ajout de pourcentage de 3 à 6 % de PP réduit la plasticité de sol témoin et même des sols reconstitués par différents pourcentages de bentonite (6%, 12%, 20% et 25%), donc l'addition de PP dans ce cas réduit le potentiel de gonflement, et pour les pourcentages entre 6% à 20%, l'indice de plasticité reste constant est égale à l'indice de plasticité initiale de chaque pourcentage de bentonite. Ce qui montre que la nature minéralogique de l'argile joue également un rôle essentiel sur le phénomène du gonflement.

5.5.4 Effet de PP sur les Caractéristiques intrinsèques

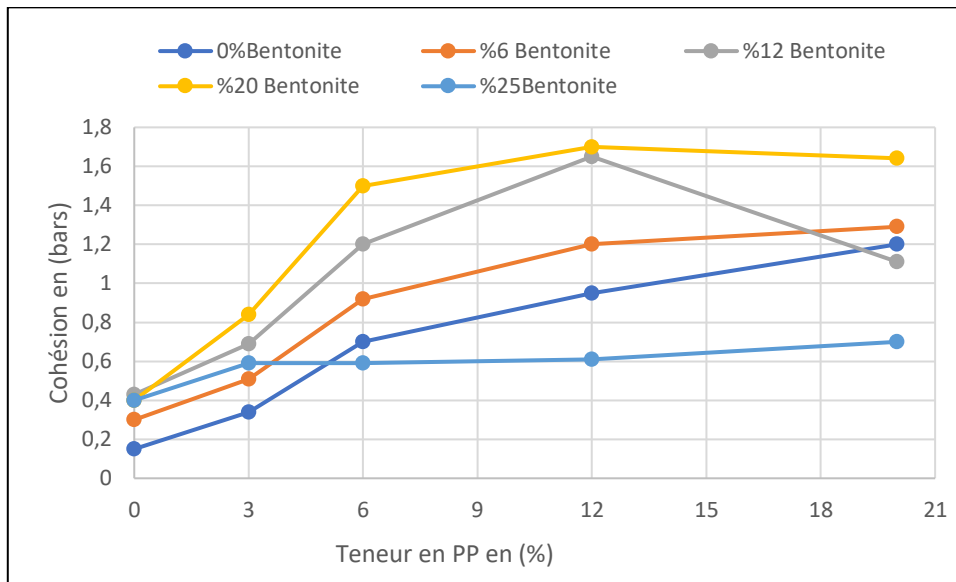


Figure 66 Effet de PP sur la cohésion des sols

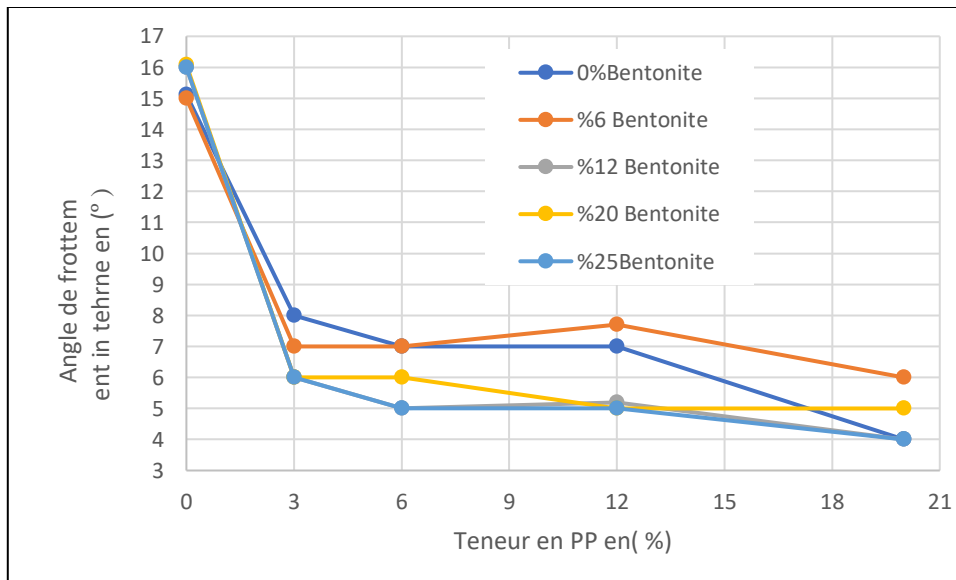


Figure 67 Effet de PP sur l'angle de frottement interne des sols

Les résultats d'essais de cisaillement rectiligne sont présentés dans les figures 66 et 67. Les paramètres de résistance au cisaillement, la cohésion est augmentée par rapport au sol non traité, par l'ajout de (3%- 6%- 12% et 20%) de PP, cette amélioration est due au changement de structure des sols traités qui forme une cimentation et ces sols deviennent plus rigides et résistants capable de résister aux charges qui suggère un changement de comportement mécanique.

L'angle de frottement interne diminue avec l'augmentation de PP, ce changement peut être due au réactions argile bentonite PP.

5.5.5 Effet de PP sur les Caractéristiques Œdométriques

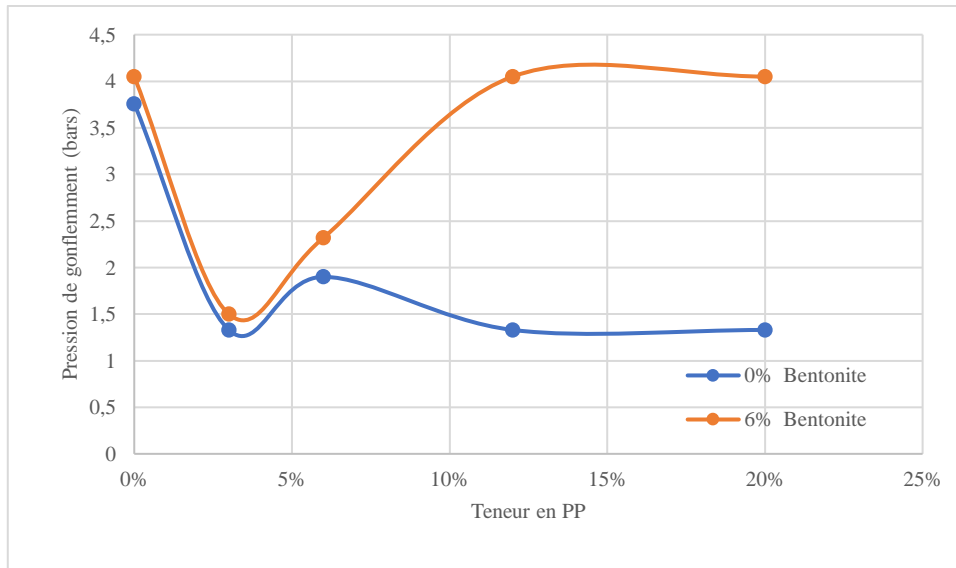


Figure 68 Effet de PP sur la pression de gonflement

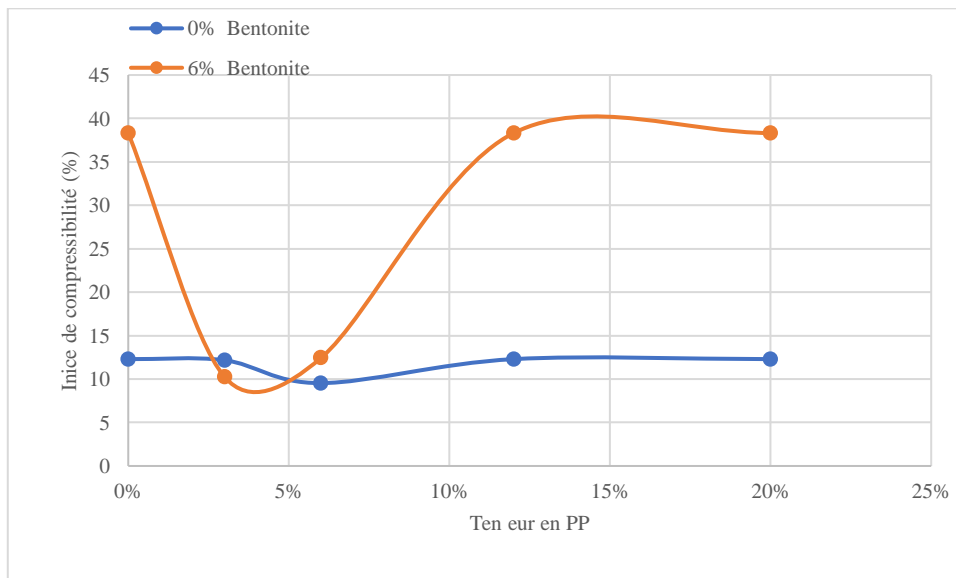


Figure 69 Effet de PP sur l'indice de compressibilité

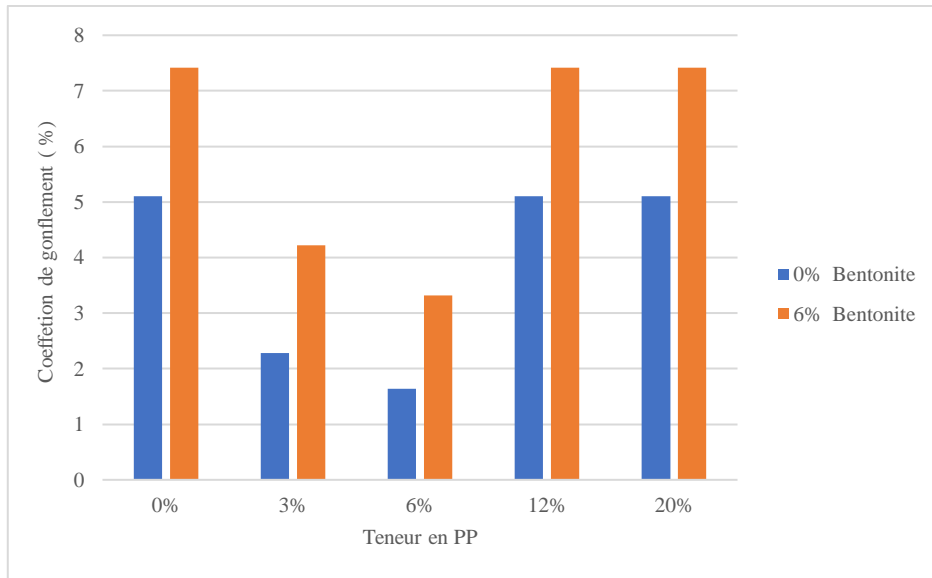


Figure 70 Effet de PP sur le coefficient de gonflement

D'après les résultats dans les figures (68, 69 et 70). L'ajout de PP diminue la pression de gonflement en fonction de l'augmentation des dosages de PP et diminue ainsi l'indice de compressibilité C_c et l'indice de gonflement C_g . Les fibres de PP distribués aléatoirement et influent sur le sol, quel que soit la nature du sol naturel ou reconstitué.

Les mélanges de sol et PP, subissent des modifications sur la structure et la texture. En présence d'eau le PP absorbe une importante quantité de cette eau, cette constatation est observée avec l'ajout de plus 12% PP, où le sol devient très sec et le PP n'influe pas le potentiel de gonflement.

5.6 Traitement par le PEHD (Polyéthylène Haute Densité)

5.6.1 Effet de PEHD sur la Valeur au Bleu de Méthylène

Les résultats des valeurs de bleu de méthylène des différentes éprouvettes de sol naturel et sols mélangés avec la bentonite en fonction des variations des pourcentages du PEHD ajoutés sont représentés sur la figure 71.

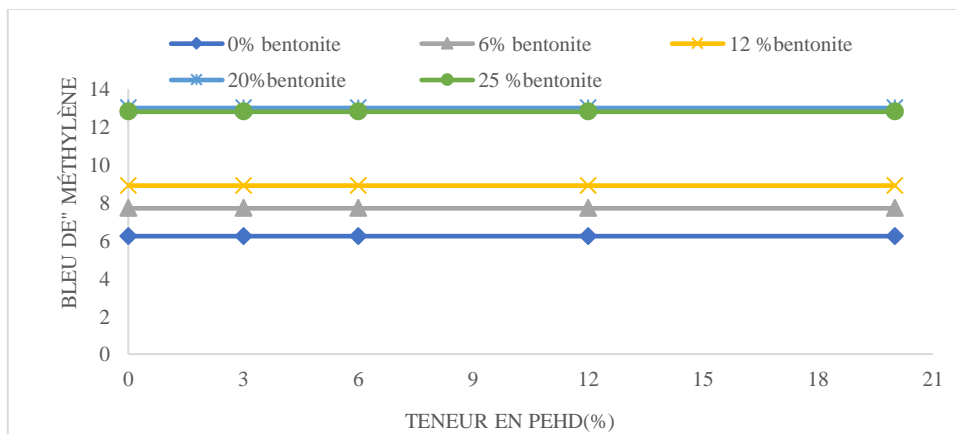


Figure 71 Effet de polyéthylène haute densité PEHD sur les valeurs de bleu de méthylène.

On observe que les valeurs de bleu de méthylène sont très proches et pratiquement les courbes sont similaires, donc l'effet de PEHD sur le VB est insignifiant à cause de l'effet de la forme et dimensions des grains de PEHD.

5.6.2 Effet de PEHD sur les paramètres de compactage

Les figures 72 et 73, présentent l'effet de l'ajout du PEHD sur les caractéristiques de compactage. On remarque qu'au faible pourcentage de bentonite, la masse volumique sèche diminue puis elle augmente avec le taux de bentonite et du PEHD, par contre et à partir 12% de bentonite, on observe une stabilisation des masses volumiques sèche en eau en fonction du taux de PEHD.

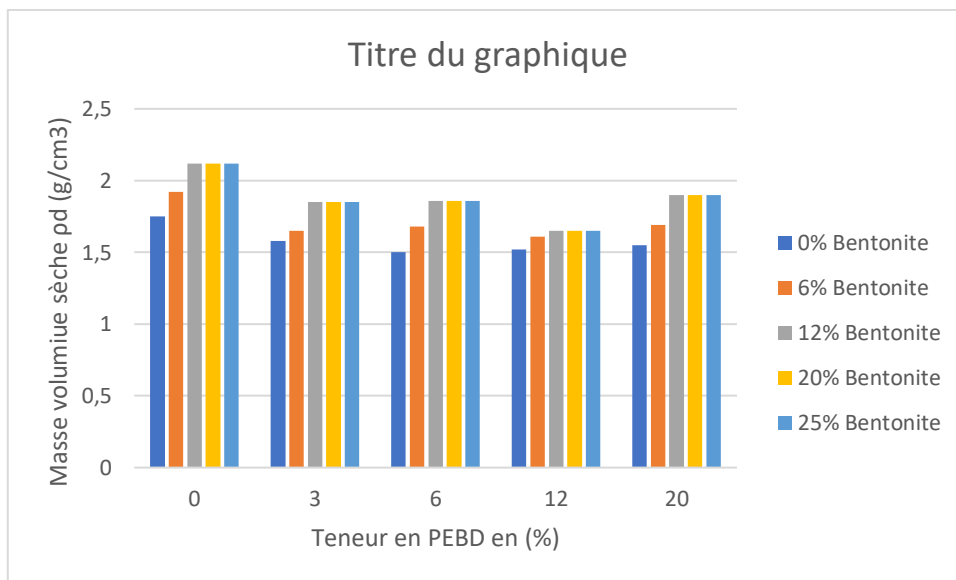


Figure 72 Effet de PEHD sur la masse volumique sèche des sols reconstitués par la bentonite

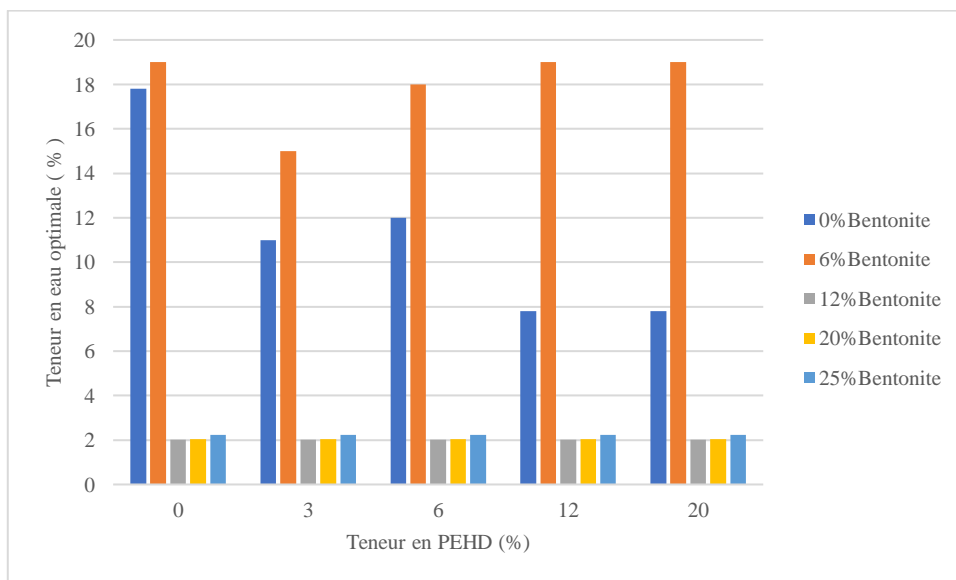


Figure 73 Effet de PEHD sur la teneur en eau optimal des sols reconstitués par bentonite.

Ce changement est considéré comme une indication de l'amélioration des caractéristiques de compactage du sol stabilisé à cause de la défloculation des minéraux des particules fines du sol, spécialement avec les dosages de 12% et 20% de PEHD. La stabilisation des teneurs en eau optimales des sols reconstitués avant et après traitement avec le PEHD est probablement à cause de la structure granulée du PEHD.

5.6.3 Effet de PEHD sur les Limites Atterberg

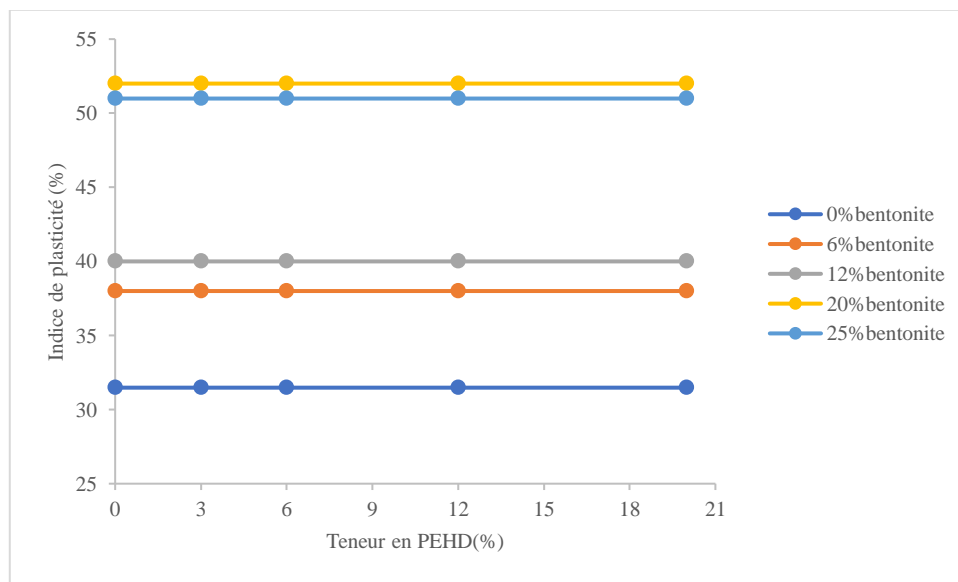


Figure 74 Effet de PEHD sur l'indice de plasticité

On observe dans la figure 74, que les valeurs de l'indice de plasticité sont très proches et pratiquement les courbes sont similaires, donc l'effet de PEHD sur l'indice de plasticité est insignifiant.

5.7 Traitement par le PEBD Polyéthylène basse densité

5.7.1 Effet de PEBD (Polyéthylène basse densité) sur les Valeurs au Bleu de Méthylène

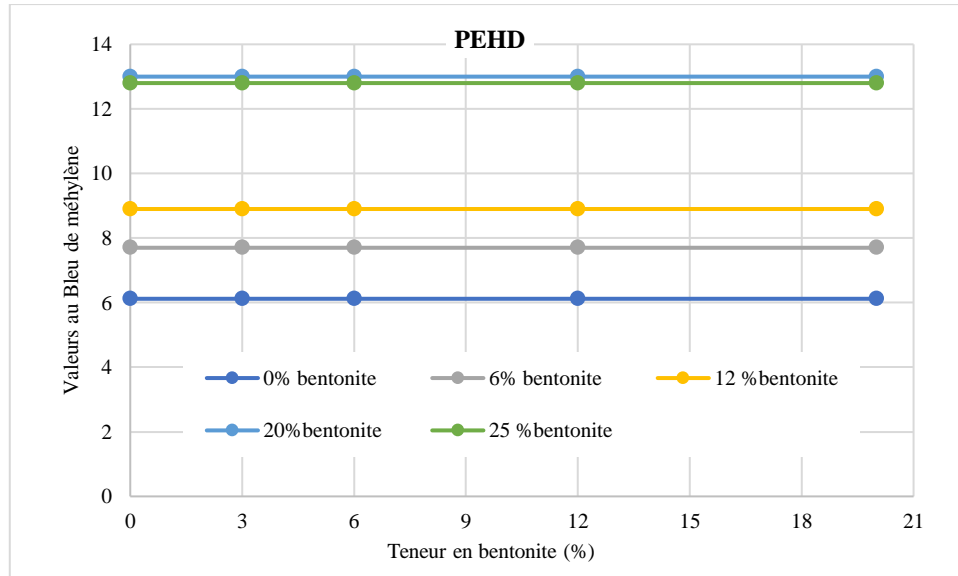


Figure 75 Effet de PEBD sur le VB des différents mélanges

Dans la figure 75, l'influence de PEBD n'est pas loin de celle de PEHD, on remarque aussi que les courbes ont les mêmes allures et les valeurs de bleu de méthylène sont stable avec la variation du taux d'ajout.

5.7.2 Effet de PEBD (Polyéthylène basse densité) sur les paramètres de compactage

Les figures 76 et 77 présentent la variation des paramètres de compactage en fonction de la variation du taux de la bentonite et le taux de PEBD.

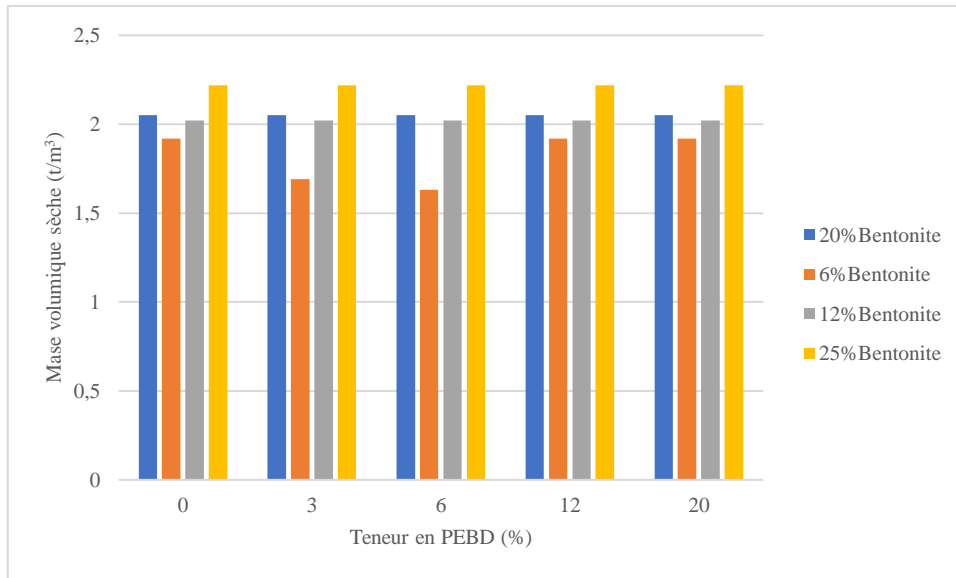


Figure 76 Effet de PEBD sur la densité sèche

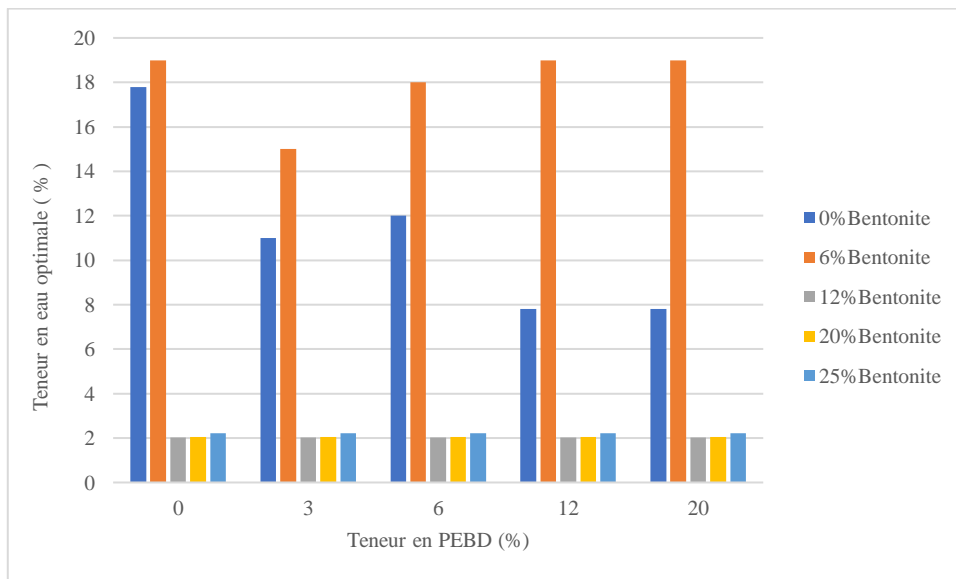


Figure 77 Effet de PEBD sur la teneur en eau

On remarque que l'introduction du PEBD dans les différents mélanges de sol et bentonite, a la même influence sur les caractéristiques de compactage avec les pourcentages de 12%, 20% et 25% de bentonite. En revanche, il y a amélioration de ces paramètres par rapport au sol naturel.

5.7.3 Effet de PEBD Polyéthylène basse densité sur les Limites d'Atterberg

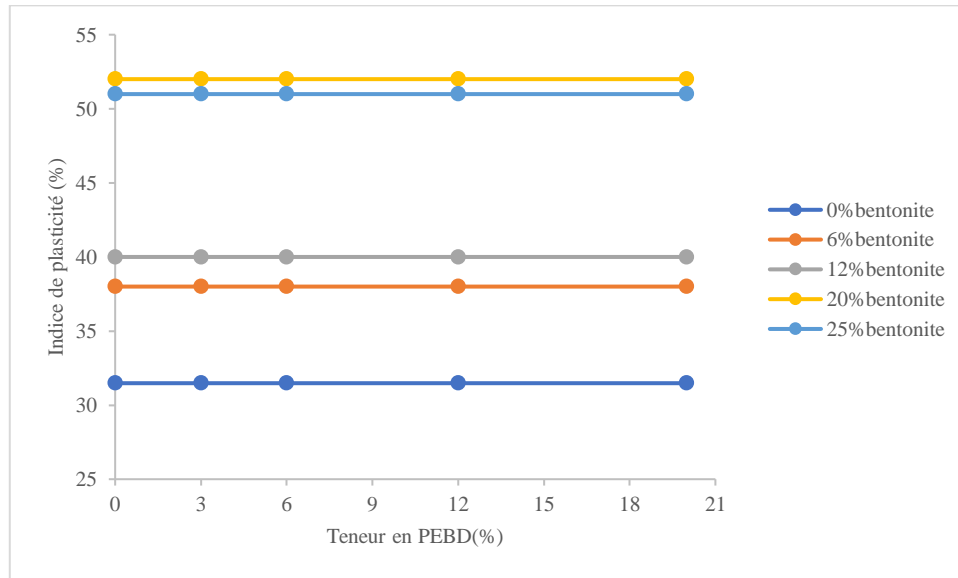


Figure 78 Effet de PEBD sur l'indice de plasticité

Dans la figure 78, on remarque que l'influence de PEBD n'est pas loin de celle de PEHD, les courbes ont les mêmes allures et les valeurs des limites d'Atterberg sont stable avec la variation du taux d'ajout, donc le PEBD n'influe pas sur les caractéristiques de plasticité avec tous les pourcentages à cause de la forme et les dimensions de ses grains.

5.8 Traitement par le PET Polyéthylène téréphtalate

5.8.1 Effet de PET sur les Valeurs au Bleu de Méthylène

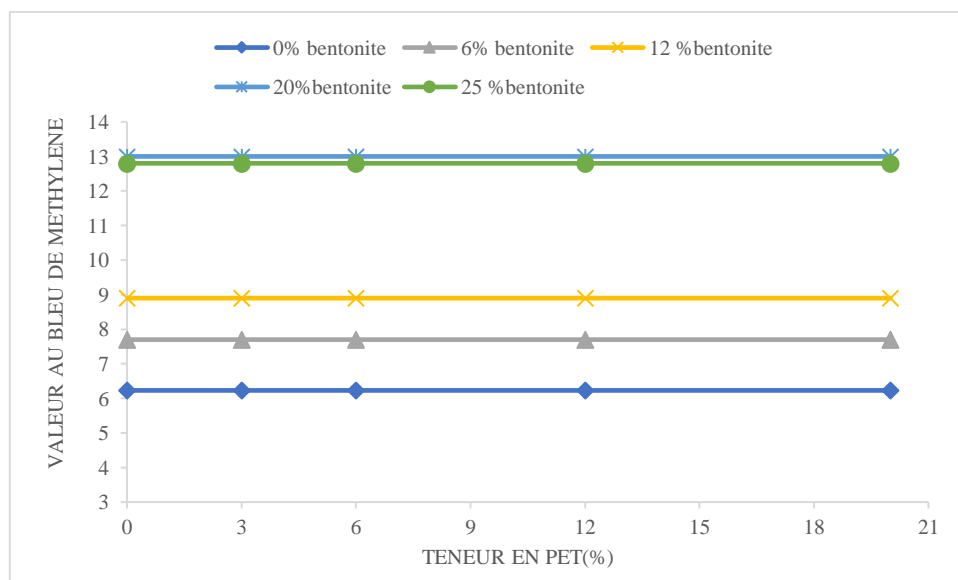


Figure 79 Effet de PET sur le VB des sols reconstitués

On observe dans la figure 79 que le VB ne change pas de valeur, il se stabilise à 6.23 pour l'argile naturelle, de 6.73 pour le sol reconstitué par 3% de bentonite, de 7.7 pour 6% de bentonite, de 8.9 pour 12% de bentonite, de 13 pour 20% et de 12.8 pour 25 % de bentonite. L'effet du PET sur les valeurs de bleu de méthylène est négligeable.

5.8.2 Effet de PET sur les paramètres de compactage

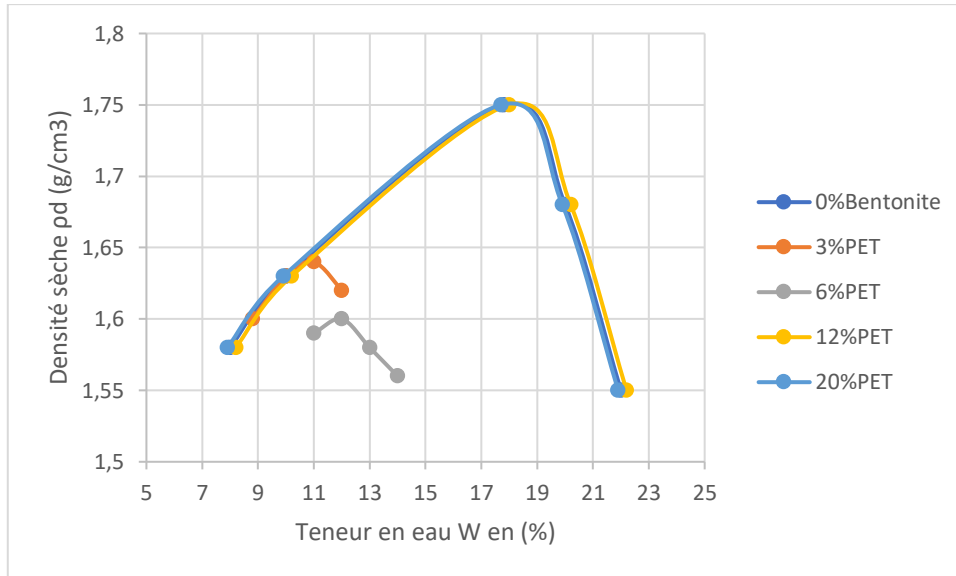


Figure 80 Courbes Proctor de l'argile naturelle avec différents taux de PET

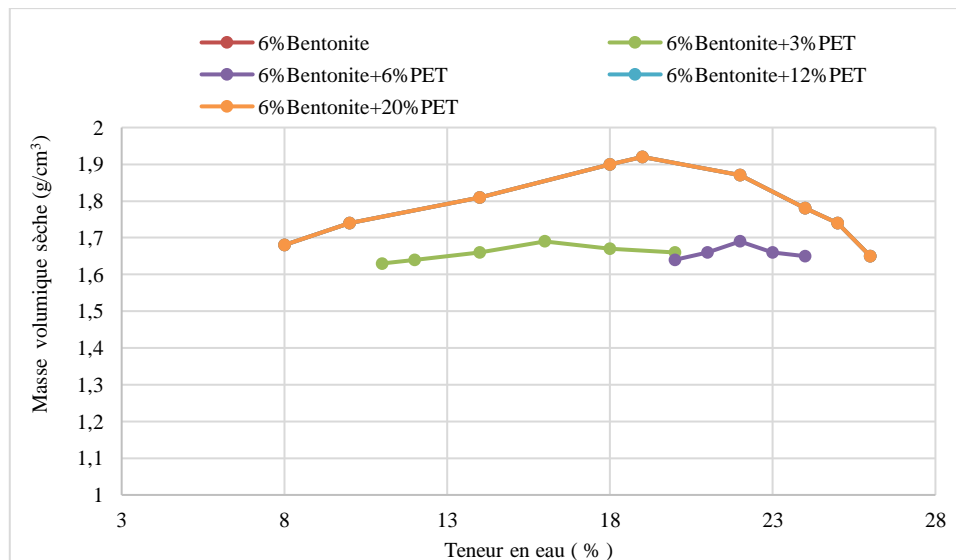


Figure 81 Courbes Proctor avec différents taux de PET pour le sol reconstitué par 6% de bentonite

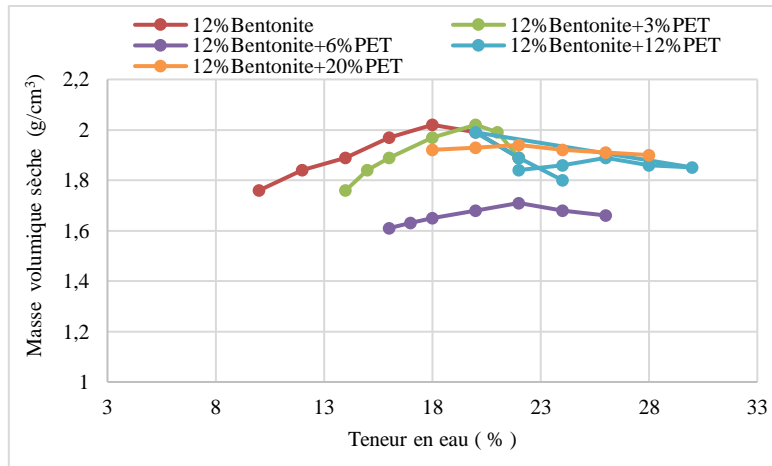


Figure 82 Courbes Proctor avec différents taux de PET pour le sol reconstitué par 12% de bentonite

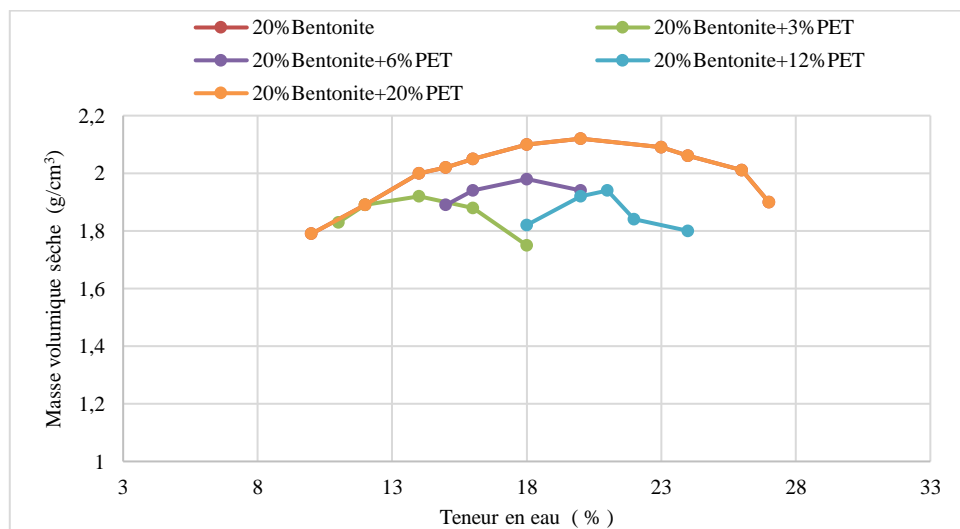


Figure 83 Courbes Proctor avec différents taux de PET pour le sol reconstitué par 20% de bentonite

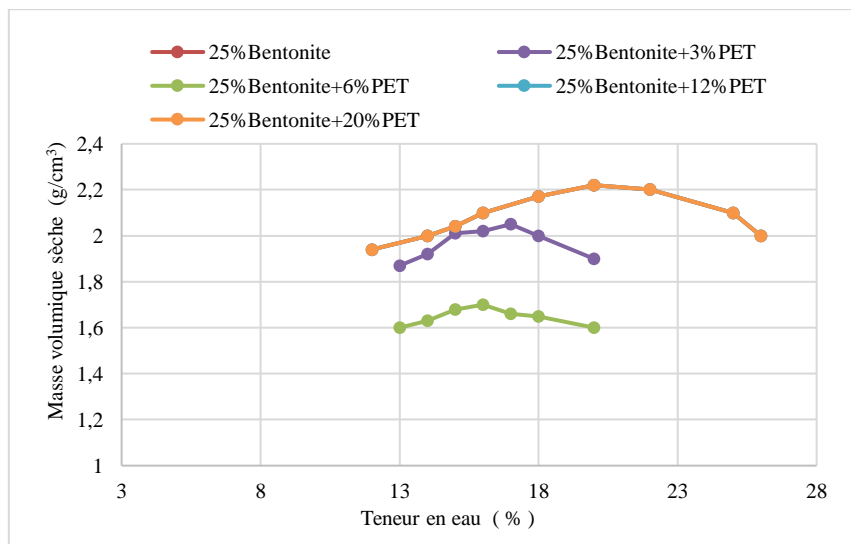


Figure 84 Courbes Proctor avec différents taux de PET pour le sol reconstitué par 25% de bentonite

On a remarqué dans les figures (80 à 84) une réduction de la masse volumique sèche de 1.63t/m^3 du sol non traité à 1.47 t/m^3 pour 6% de PET. A partir de ce pourcentage la densité est devenue constante. Ce comportement est justifié par le besoin d'une faible énergie de compactage. La teneur en eau du sol initial est 7.8%. Elle augmente progressivement jusqu'à 12%, et diminue à 7.8 pour 12% de PET et se stabilise pour 20% de l'ajout, cette variation est expliquée par l'insuffisance de la quantité d'eau par rapport à la quantité de l'ajout surtout que ce dernier a une forte capacité d'absorption.

5.8.3 Effet de PET sur les Limites Atterberg :

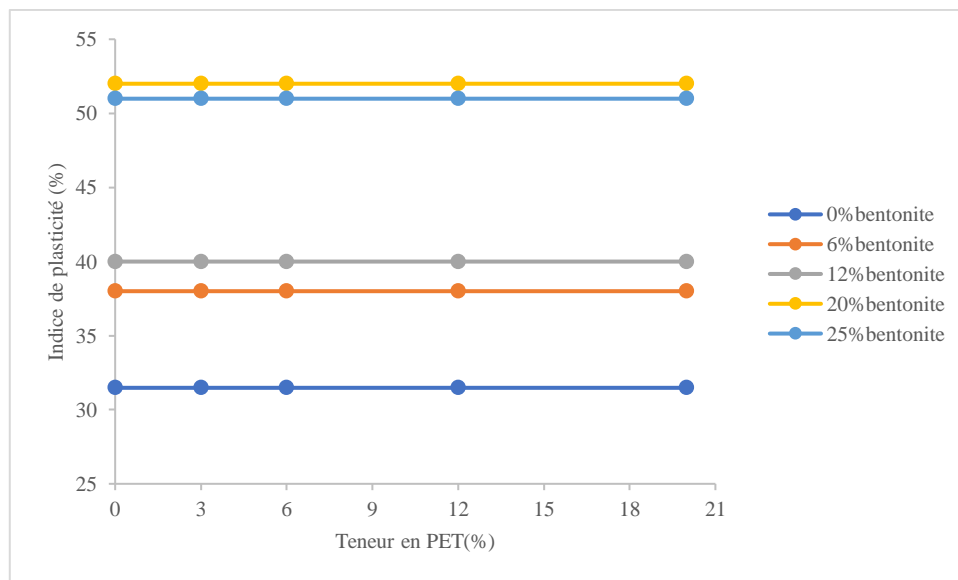


Figure 85 Effet de PET sur les limites d'Atterberg pour les différents mélanges

Les résultats présentés dans cette figure 85 montrent que le PET n'influe pas sur les caractéristiques de plasticité avec tous les pourcentages à cause de la forme et dimensions des grains de l'ajout.

5.9 Conclusion

Dans cette recherche, nous avons étudié l'effet de différents teneurs en polymères sur la plasticité et le comportement mécanique des sols gonflants. Les sols ont été étudiés à l'aide d'une série d'essais en laboratoire, avec une comparaison des sols non stabilisés et des sols gonflants stabilisés avec 0 %, 3 %, 6 %, 12 % et 20 % de (polychlorure de vinyle, Polypropylène, Polyéthylène haute densité, Polyéthylène basse densité et Polyéthylène téréphtalate).

Les conclusions et les recommandations de cette étude sont :

- Le mélange du sol avec des quantités de bentonite de 0% ,6%,12%,20% et 25%, nous a permis d'étudier la relation entre les propriétés géotechniques et la présence de minéraux gonflants, l'augmentation dans les limites d'Atterberg observées dans cette étude en fonction de l'ajout de différents taux de bentonite est due à l'augmentation de la surface spécifique due à l'ajout de particules plus fines par rapport au sol étudié.

- Au fur et à mesure que la teneur en polychlorure de vinyle augmentait, l'indice de plasticité diminuait. La diminution de la L'indice de plasticité a amélioré la stabilité et réduit le gonflement du sol.

- Jusqu'à un taux de 12% Le polypropylène a un effet favorable sur la stabilisation du sol gonflant.

- L'effet du polyéthylène haute densité, du polyéthylène basse densité et du polyéthylène Téréphtalate sur la plasticité est négligeable.

Pour le traitement des sols gonflants par l'ajout de polymères nécessitent des mélanges entre le sol et le matériau de traitement à des dosages optimaux étudiés et testés.

Conclusion générale

Le principal problème dans les sols gonflants est dans la déformation du sol et autour des structures. Des déplacements excessifs peuvent également entraîner des dommages aux structures et aux ouvrages publics. Tout problème, petit ou grand, a un impact négatif important sur la performance de la structure en termes de temps et de coût, la manipulation de sols déformables nécessite la connaissance et la compréhension de la géologie du matériau du sol. La stabilisation des sols argileux a été étudiée par un grand nombre de chercheurs, et beaucoup de méthodes et d'appareillages ont été mis au point, pour avoir des solutions qui minimisent le phénomène de gonflement.

Le choix des techniques de stabilisation utilisées dépend de plusieurs paramètres tels que : (la considérations économiques, la nature du sol à traiter, la durée de l'opération, la disponibilité des matériaux à utiliser ainsi que les conditions d'environnement, à la place des techniques traditionnelles de traitement et d'amélioration des sols, des approches biologiques sont actuellement étudiées dans le domaine de l'ingénierie géotechnique et des nombreuses recherches récentes sont basées sur l'utilisation des polymères pour améliorer le comportement des sols à problème .

L'objectif de cette thèse de doctorat est l'étude de l'effet des particules argileuse sur le potentiel de gonflement en utilisant l'ajout de la bentonite de Meghnia et le traitement de ces sols gonflants par cinq polymères (PVC, PP, PEHD, PEBD et PET) est étudier pour le but de l'amélioration de leurs propriétés mécaniques et physique, les polymères utilisés ont été choisis en fonction de leur disponibilité et de leur intérêt économique dans la région de Skikda ('Ramadan Djamal) d'où les sols ont été échantillonnés. Après avoir identifié et classifié les sols et Afin d'évaluer l'effet sur les caractéristiques géotechniques de ces sol reconstitué (Sol-Bentonite) une série d'essais géotechniques (VBS, limite d'Atterberg, test de Proctor, test de cisaillement direct, test d'œdomètre) a été effectués sur ces sols traités avec différents taux de polymères.

Les conclusions qui peuvent être tirées dans cette étude peuvent être résumées comme suit :

- Le mélange du sol avec des quantités de bentonite allant de 0%,6,12,20 et 25%, nous a permis d'étudier la relation entre les propriétés de plasticité et la présence de minéraux gonflants, l'augmentation des limites d'Atterberg observées dans cette étude est due à l'augmentation de la surface spécifique par l'ajout de particules plus fines

- Au fur et à mesure que la teneur en polychlorure de vinyle augmentait, l'indice de plasticité diminuait, ce qui amélioré la stabilité et réduisait le gonflement du sol.
 - Jusqu'à un taux de 6%, le polypropylène a un effet favorable sur la stabilisation du sol gonflant.
 - L'effet du polyéthylène haute densité, du polyéthylène basse densité et du polyéthylène Téréphtalate sur la plasticité est négligeable.
 - Des solutions optimales pour stabiliser le gonflement du sol par l'ajout de polymères nécessitent des mélanges entre le sol et le matériau de renforcement à des dosages optimaux étudiés et testé.
- Le traitement par polychlorure de vinyle et par Polypropylène modifie les paramètres physiques du sol et produit des résultats très satisfaisants en diminuant le potentiel de gonflement et la plasticité du sol, tout en renforçant sa résistance.

Quelques recommandations peuvent être faite sur la base de la présente étude pour des applications pratiques :

- ✓ Modélisation numérique du gonflement d'un sol traité avec des polymères
- ✓ Tester le traitement des sols sur place avec ces ajouts, c'est-à-dire dans des conditions réelles.
- ✓ Explorer l'utilisation de ces ajouts dans d'autres types de sols problématiques
- ✓ Réalisation des analyses minéralogiques et chimiques du sol traité d'une manière plus poussée.

Références bibliographiques

A.Jemal, E.C. Agon, A. Geremew, Utilization of crushed stone dust as a stabilizer for subgrade soil: a case study in jimma town, Ann. Fac. Eng. Hunedoara 17 (4) (2019) 55–64.

Baba Hassane Ahmed Hisseini. (2004), traitement par alcali-activation et géopolymérisation de sols argileux, caractérisations physicochimiques, géotechnique et environnementale. géomorphologie. université gustave eiffel.

Buhleier, E., Wehner, W., Vögtle, F., synthesis (1978), 155

Bishnoi, D.K.M., A Result Paper on Experimental Study on Stabilization of Soil Subgrade by Adding Stone Dust. 2019.

Boukhedimi Mohamed Amine, (2008), origine du processus de bentonitisation des terrains volcaniques rhyolitiques de hammam bouhrara (maghnia ; algérie nord occidentale), thèse de magister, université d'oran.

Christopher M Geiman (2005), Stabilization of soft clay subgrades in Virginia phase I laboratory study, Thesis Master of Science Faculty of the Virginia Polytechnic Institute.

D. A. Tomalia, j. M.j. frechet. Dendrimers and other dendritic (2001). Polymers; wiley, New York.

D. Saxena, Effects of marble powder and fine sand on properties of expansive soil, Int J. Eng. Trends Technol. 52 (1) (2017) 12–16p.

Différents types de matières plastiques, "[http://: cap-sciences.net/upload/differents_plastiques](http://cap-sciences.net/upload/differents_plastiques).

Darikandeh, F., B. Viswanadham, and M. Arabani, Small-scale laboratory test on expansive soil stabilized by CCR-Fly ash columns. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement, 2020 : p. 1–9.

Fatemeh Mousavi, Ehsan Abdi, Hassan Rahimi, 2014 effect of polymer stabilizer on swelling potential and CBR of forest road material, ksce journal of civil engineering, 18 (7), 2

F. Moingeon (2006).; thèse de doctorat ; option chimie; université louis pasteur strasbourg i,

Ferrah. F. (2006). Prise en compte du gonflement pour le dimensionnement des fondations superficielles. Thèse de magister, Université de Batna, Batna, Algérie.

G. Sahu, I. Kumar, A. Singh, D. Gupta, Studies on improvement of shear strength of sandy soil using egg shell powder and quarry dust, *Int. J. Eng. Res. Tech.* 6 (2017) 440–443.

H.A. Abdelkader, M. Hussein, H. Ye, Influence of waste marble dust on the improvement of expansive clay soils, *Adv. Civ. Eng.* 2021 (2021).

I. Teraoka, polymer solutions, an introduction to physical properties, ed.

Int.J. of Geomate, Sept. (2014), Vol. 7, No. 1 (Sl. No. 13), pp. 927-937 *Geotech., Const. Mat. & Env.*, 2186-2990(O), Japan.

Inyang H, Bae S, Mbamalu G, and Park S, (2007). Aqueous polymer effects on volumetric swelling of na-montmorillonite j. *Mater. Civ. Eng.*, 19, special issue: geochemical aspects of stabilized materials, 84–90.

J.P. Sahoo, P.K. Pradhan, Effect of lime stabilized soil cushion on strength behaviour of expansive soil, *Geotech. Geol. Eng.* 28 (6) (2010) 889–897.

J.A. Oke, M.K. Olowoyo, Stabilization of laterite soil with eggshell powder and sodium silicate used as fill material in road construction, *Arid Zone J. Eng. Technol. Environ.* 15 (3) (2019) 586–597.

J. Diana, J. Naveena, S.N. Prasath, Improvement of subgrade clayey soil using eggshell, *Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Technol.* 5 (3) (2017) 983–989.

Jin Liu, Bin Shi, Hongtao Jiang, He Huang, Gonghui Wang, Toshitaka Kamai. (2011) research on the stabilization treatment of clay slope topsoil by organic polymer soil stabilizer, *engineering geology*, 117, 114–120.

Khelifi, Z. ; Allal, M.A. ; Abou-Bekr, N. ; Taïbi, S. ; Duchemin, B. The mechanical and crystallographic evolution of stipa tenacissima leaves during in-soil biodegradation. *J. Renew. Mater.* 2018, 6, 336–346.

k. Yan and l. Wu, (2009). Swelling behavior of compacted expansive soils, recent advancement in soil behaviour, in proceedings of the situ test methods, pile foundations, and tunneling: selected papers from the 2009 geohunan international conference, pp. 1–6, changsha, china.

L GHammadi, N Boudjenane, M Belhadri, (2014). Effect of polyethylene oxide (peo) and shear rate on rheological properties of bentonite clay, *applied clay science*, 99, 306–311.

Liu J, Shi B, Huang H, Jiang H (2009), Improvement of water-stability of clay aggregates admixed with aqueous polymer soil stabilizers, *Catena.*, 77, 175–17.

L Hammadi, N Boudjenane, M Belhadri, (2014), Effect of polyethylene oxide (PEO) and shear rate on rheological properties of bentonite clay, *Applied Clay Science*, 99, 306–311.

Mazahir M. M. Taha, Cheng Pei Feng and Sara H. S. Ahmed, (2020). Influence of polypropylene fibre (pf) reinforcement on mechanical properties of clay soil. *Advances in polymer technology*, 15 pages

Merah Chafia. 2018, Modélisation du comportement hydromécanique des sols gonflants. These de doctorat, Badji Mokhtar – Annaba University.

Mourroux P, Margon P. et Pinte J.C. (1988) : « La construction économique sur les sols gonflants : Manuels et méthodes ». Vol. 14, BRGM, France.

Maity, J.; Chattopadhyay, B.C.; Mukherjee, S.P. Variation of compaction characteristics of sand randomly mixing with various natural fibers. In *Proceedings of the Indian Geotechnical Conference*, Kochi, India, 15–17 December 2011.

Magdi M. E. Zumrawi, Aya E. Mohammed, (2019), Effects of Poly Vinyl Acetate on Characteristics of Expansive Soil, *Journal Of Materials And Engineering Structures* 6 167–176

Mpofu P, Addai-Mensah J and Ralston J, (2004). Flocculation and dewatering behaviour of smectite dispersions: effect of polymer structure type, *minerals engineering*, 17, 411-423.

M A. Mohsin and n. F. Attia, (2015). Inverse emulsion polymerization for the synthesis of high molecular weight polyacrylamide and its application as sand stabilizer, *international journal of polymer science*, 10 pages

Nwankow K N, (2001). Polyacrylamide as a Soil Stabilizer for Erosion Control. Wisconsin Department of Transportation, Madison. Report.,

Naji, J., H. Bilsel, and A. Balkis. Effect of fly ash-limestone dust stabilization on volume change and strength of expansive soil. in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. IOP Publishing.

Oluwatuyi, O.E., Adeola, B.O., Alhassan, E.A., Nnochiri, E.S., Modupe, A.E., Elemile, O.O., & Akerele, G. (2018). Ameliorating effect of milled eggshell on cement stabilized lateritic soil for highway construction. *Case Studies in Construction Materials*, 9, e00191.

Polymere" microsoft ® encarta ® 2007. [Cd]. Microsoft corporation

P.J. Flory. (1953). *Principles of polymer chemistry*; ithaca, ny: cornell university press.

Patrice HAMELIN, (2010), *Polymères renforcés de fibres (FRP), Identification et champs d'application*.

- P. Indiramma, C. Sudharani, S. Needhidasan, Utilization of fly ash and lime to stabilize the expansive soil and to sustain pollution free environment—an experimental study, Mater. Today.: Proc. 22 (2020) 694–700.**
- P. Indiramma, C. Sudharani, S. Needhidasan, Utilization of fly ash and lime to stabilize the expansive soil and to sustain pollution free environment—an experimental study, Mater. Today.: Proc. 22 (2020) 694–700.**
- Qassun S Mohammed Shafiqu and Safa H Hasan, (2018), Improvement an Expansive Soil using Polymethacrylate Polymer, International Conference on Materials Engineering and Science IOP Publishing IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 454 012138 doi:10.1088/1757-899X/454/1/012138**
- Rehab Bekkouche S And Boukhatem G. (2016). experimental characterization of clay soils behavior stabilized by polymers. j. fundam. appl. sci., 8(3), 1193-1205.**
- Robert. A et D. Fabre. (1987) : « Rapport sur le gonflement ». Comité Français de Mécanique des Roches, Groupe de travail : Rupture en souterrain.**
- S. Jouenne, (2005). These de doctorat ; option chimie et physicochimie des polymeres ; universite pierre et marie curie.**
- Souhila Adjabi, Mohamed Salah Nouaouria & Cherif Betei. (2017). Effect of reinforcement fibers on the collapse potential of clayey sands. MATEC Web of Conferences 149, 01034**
- Souhila Rehab Bekkouche, Mohammed Benzerara, Umar Zada, Ghulam Muhammad and Zulfiqar Ali, Use of Eco-Friendly Materials in the Stabilization of Expansive Soils, Buildings 2022, 12, 1770. <https://doi.org/10.3390/buildings12101770>**
- Tiwari, N. ; Satyam, N. ; Puppala, A.J. Strength and durability assessment of expansive soil stabilized with recycled ash and natural fibers. Transp. Geotech. 2021, 29, 100556.**
- Tomalia, d. A., Baker, h., Dewald, j., Hall, m., Kallos, g., Martin, s., Roeck, j., Ryder, j., Smith, p., polym. J. (1985), 17, 117.**
- Waseim Ragab Azzam. (2014). Durability of expansive soil using advanced nanocomposite stabilization, int. J. Of geomate, sept, 7 (1), 927-937**
- X. Lefebvre, (2002). Fissuration fragile lente du polyamide 11 : mecanisme et duree de vie en fluage, these de doctorat, ecole nationale superieure des mines de paris.**
- Yueo Zha, (2008). Chm 504. Chimie des polymères, université de sherbrooke faculté des sciences département de chimie.**

Zana Taher, Joseph Scalia, Christopher Bareither, 2020, Comparative assessment of expansive soil stabilization by commercially available polymers, Transportation Geotechnics 24(1):100387DOI : 10.1016/j.trgeo.2020.100387

